



Septiembre – Diciembre 2020, Vol. 27, N° 3, 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>
www.redalyc.org/revista.oa?id=707

VALENCIA – VENEZUELA

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200
Online ISSN: 2610-8240

**Revista
Ingeniería UC**

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.

**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

Prof. Cristóbal Vega, PhD Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela ☑

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán, MSc. Instituto de Matemática y Calculo Aplicado - IMYCA, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ☑

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. MSc. 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
Ingeniería UC**

Revista indizada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing)
LATIDEX-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.

**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. Henríquez 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)
Correo-e: jjjimenezgriman@gmail.com (J. Jiménez)

Redes sociales

 Twitter: @RevistaIngUC



Instagram: revistainguc

Diseño y Diagramación: **Revista Ingeniería UC**, Dirección de Investigación – IMYCA (C. Vega) – CATS (J. Jiménez) en L^AT_EX,
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 27 Número 3 **246**

Editorial volumen 27 número 3 **247**

Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales

1 Estado del arte. Avances recientes en el diseño de nanoemulsiones: conceptos y tendencias sobre nanocosméticos

Review. Recent advances in nanoemulsions design: concepts and trends across nanocosmetics

249

Ruth Monroy, Juan Pereira

2 Caracterización e incorporación de un extracto de semillas de parchita (*Passiflora edulis*) en un hidrogel

Characterization and incorporation of an extract of passion fruit seeds (*Passiflora edulis*) in a hydrogel

Emilly Scotti, Ingrid Velásquez, Luis Ojeda, Franklin Pacheco, Nirza Noguera-Machado **273**

3 Design of Low Power Fast Full Adder using Domino Logic Based on magnetic tunnel junction and Memristor

Diseño de sumador completo rápido de baja potencia utilizando Domino Logic basado en unión de túnel magnético (UTM) y Memristor

Pooria Parvizi, Reza Sabbaghi-Nadooshan, Mohammad Bagher Tavakoli **282**

4 High-Performance 4×1 Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic

High-Performance 4×1 Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic

Hamed Fooladvand, Karim Abbasian, Hamed Baghban **294**

5 Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción

Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as an agro-industrial waste for use as a construction material

Paulina Viera, Darío Aguirre, José María Monzó

304

6 Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú

Efficiency of water collection for three types of mesh trappers in rural highlands of the northern highlands of Peru

Luis Vásquez Ramírez, Luis Cieza-León, Dante Cieza-León

319

7 Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz, Áncash, Perú

Estimation model of the Manning roughness coefficient as a function of granulometry in the Santa River, Recuay–Carhuaz sector, Áncash, Perú

Abelardo Díaz–Salas, Edilberto Guevara–Pérez, Juan Rosales–Cueva

328

8 Modelo matemático de conductividad eléctrica en función del flujo acuífero en suelos usando mallado de flujos

Mathematical model of electrical conductivity as a function of water flow in soils using Flow Net

David Duarte-González

343

9 An assessment of development level of villages in Lorestan province using numerical taxonomy method

Evaluación del nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestán utilizando el método de taxonomía numérica

Maryam Hasanvandia, Alireza Poursaeed, Roya Eshraghi Samani, Hamed Chaharsoughi Amin **353**

10 Measuring angular coordinates in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) positioning systems and developing a new phase-metric method for goniometric control of UAVs

Medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT

O. R. Kuzichkin, G. S. Vasilyev, D. I. Surzhik, A. V. Grecheneva, I. A. Kurilov, S. M. Kharchuk

367

11 Diseño del sistema de suspensión para vehículo de acuerdo con parámetros BAJA SAE

Suspension system design for a vehicle under BAJA SAE parameters

Omar Franco-Camacho, María Mago-Ramos, Ricardo Ríos, Luis Vallés-Defendine **374**

Índice de materias **388**

Subjects index **389**

Índice de autores (*Author index*) **391**

Apéndices **1**

A. Línea editorial **2**

B. Editorial line **3**

C. Políticas de ética y publicación **4**

D. Ethics and Publication Policies **8**

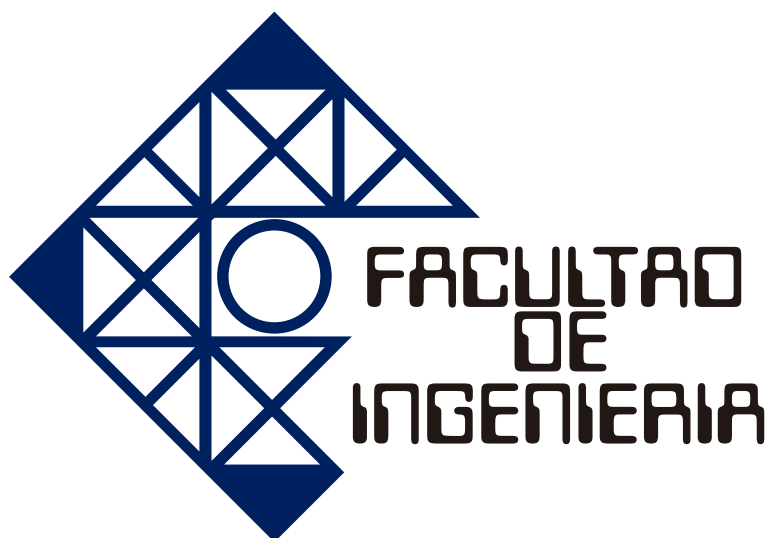
E. Normas para la presentación de artículos **11**

F. Authors Information **14**

G. Carta de compromiso **16**

H. Compromise letter **17**

I. Índices de Revista Ingeniería UC **18**



Volumen 27 Número 3

Editorial

Cerramos un año de grandes cambios y transformaciones, un año que nos ha dejado muchas lecciones y que también nos ha permitido redimensionar muchos aspectos de nuestra vida personal y laboral. Queremos aprovechar la oportunidad de recordar los logros alcanzados como lo fue la incorporación de la Revista Ingeniería UC a DOAJ y REDIB, así como también hacer extensivo nuestro agradecimiento a todo el equipo de Latindex y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por los programas de formación y capacitación de editores para asegurar la calidad y visibilidad de nuestras revistas científicas tanto en el contexto regional como internacional y por último, ratificar una vez más nuestro firme compromiso de continuar siendo el principal órgano de divulgación científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo expandiéndonos cada vez más, para seguir brindando la mayor visibilidad posible de los productos de investigación de gran calidad asociados a las diversas ramas de la ingeniería y ciencias afines.

Abrimos la edición de nuestro Volumen 27, Número 3, presentando el estado del arte desarrollado por Monroy y Pereira con los avances más recientes en lo referente al diseño de nanoemulsiones, resaltando el interés científico-tecnológico vinculados con los avances y desarrollos sobre nanotecnología cosmética, producción y tendencias de uso.

En segundo lugar, Scotti y su grupo realizan la caracterización de un extracto de semillas de parchita (*Passiflora edulis*), estudio que resalta su importancia por su potencial como agente antimicrobiano y antioxidante para su incorporación en elaboración y producción de hidrogel.

Por otro lado, Parvizi y colaboradores proponen un circuito sumador completo de baja potencia y alta velocidad, que utiliza una nueva familia lógica de dominó CMOS basada en elementos de unión de túnel magnético (UTM) y memristor en la técnica de entrada de difusión de puerta (GDI).

Fooladvand, Abbasian y Baghban muestran que se podría obtener una simplificación importante mediante el diseño de circuitos integrados basados en CNTFET a través de una configuración lógica de transistor de paso tipo CMOS en el uso de transistores de efecto de campo, en lugar de la configuración tradicional de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS).

Así, Viera junto a su grupo de investigación, determina las características físico-mecánicas de los fardos de paja producidos en Ecuador, para definir su posible uso en la construcción de viviendas sismorresistentes. Mientras que, Vásquez-Ramírez y colaboradores estimaron la eficiencia de captación de agua contenida en la niebla y neblina en una zona de las alturas de la sierra norte del Perú, utilizando atrapanieblas con diseño bidimensional, construidas con tres tipos de mallas, fundamentando así la implementación de este tipo de captación de agua no convencional en la zonas rurales altoandinas con déficit de agua para uso múltiple.

Díaz-Salas, Guevara-Pérez y Rosales-Cueva establecen un modelo novedoso para determinar el coeficiente de rugosidad (n), en un sector montañoso del río Santa en el departamento de Ancash, Perú. Por otro parte, Duarte-González estudia las relaciones de orden físico-matemático que rigen la conductividad eléctrica y la hidrodinámica en suelos porosos, involucrada en los sistemas de riego agrícola y también en sistemas de puesta a tierra (SPAT).

Hasanvandian y colaboradores evalúan el nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestan utilizando el método de taxonomía numérica. Mientras que Kuzichkin y su grupo presentan la medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT.

Para cerrar el número, Franco-Camacho y su grupo de investigación abordan el diseño de un sistema de suspensión para un vehículo BAJA SAE bajo los Parámetros SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices).

Cerramos este editorial, expresándoles nuestros mejores deseos para el año 2021 e invitando a publicar en nuestra Revista INGENIERÍA UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería y ciencias afines.

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

Profesor *Ángel Almarza-Morales*, Dr.
Editor – Jefe

Review. Recent advances in nanoemulsions design: concepts and trends across nanocosmetics

Ruth Monroy , Juan Pereira * 

*Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y derivados (PHD), Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología FACYT.
Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela*

Abstract.- The cosmetic industry has boomed in recent years as one of the markets with enormous growth potential. Cosmetic products that contain nanoemulsions, as carriers of active compounds, can move through the stratum corneum, promoting the release of active ingredients into the dermis. The lipophilic active ingredients that are most interesting in skin care are: vitamin E, lycopene, carotenoids, polyphenols, or coenzyme Q-10 or simply non-alcoholic fragrances. The small size of the dispersed phase droplets is another important factor that confers important physicochemical and biological characteristics. It prevents flocculation and coalescence of nanoemulsions, and the Brownian movements are sufficient to overcome the sedimentation of the droplets by gravity. Additionally, the reduced droplet size also provides better skin deposition and penetration of nanoemulsions, enabling efficient delivery of active ingredients compared to conventional vehicles. This review highlights some of the most important scientific-technological contributions, a documentary review on the methods of making nanoemulsions, both high energy and low energy, their advances and outstanding developments in the area currently.

Keywords: nanoemulsions; PIT; PIC; dermal delivery; transdermal delivery; spontaneous emulsion.

Estado del arte. Avances recientes en el diseño de nanoemulsiones: conceptos y tendencias sobre nanocosméticos

Resumen.- La industria cosmética ha experimentado un auge en los últimos años como uno de los mercados que tiene un enorme potencial de crecimiento. Los productos cosméticos que contienen nanoemulsiones (NE), como portadores de compuestos activos, pueden moverse a través del estrato córneo, promoviendo la liberación de activos hacia la dermis. Los ingredientes activos lipofílicos que presentan mayor interés en el cuidado de la piel son: la vitamina E, el licopeno, carotenoides, los polifenoles, o coenzima Q-10 o simplemente las fragancias no alcohólicas. El pequeño tamaño de las gotas de la fase dispersa es otro factor que confiere características fisicoquímicas y biológicas importantes. Impide la floculación y la coalescencia de las nanoemulsiones, y los movimientos brownianos son suficientes para superar la sedimentación de las gotas por gravedad. Además, el tamaño reducido de las gotas también proporciona una mejor deposición sobre la piel y penetración, lo que permite una entrega eficiente de ingredientes activos en comparación con los vehículos convencionales. En esta revisión se destacan algunas contribuciones científicas-tecnológicas importantes, se presenta una revisión documental sobre los métodos de elaboración de nanoemulsiones, tanto de alta energía como de baja energía, así como los avances y desarrollos resaltantes sobre nanocosméticos.

Palabras clave: nanoemulsiones; PIT (Por sus siglas en inglés, temperatura de inversión de fase); PIC (Por sus siglas en inglés, composición de inversión de fase); administración transdérmica; emulsión espontánea.

Recibido: 28 de agosto, 2020.

Aceptado: 26 de noviembre, 2020.

1. Introducción

Las nanoemulsiones son un sistema prometedor para el uso cosmético debido a varias ventajas sobre

otras tecnologías (como emulsiones, liposomas y microemulsiones, espumas, geles, dispersiones, etc.), incluida la facilidad de fabricación, tamaños de partículas controlables, alta estabilidad cinética y niveles de tensioactivos relativamente bajos [1, 2, 3]. La eficacia de los productos cosméticos depende de sus propiedades de textura y de su capacidad para transportar ingredientes activos y funcionales. Los componentes lipofílicos, hidrofílicos y

* Autor para correspondencia:

Correo-e: juanpereira73@gmail.com (J. Pereira)

anfílicos se pueden incorporar fácilmente en las nanoemulsiones porque contienen aceite, agua y regiones interfaciales de gran área. La aplicación tópica de nanoemulsiones en la piel proporciona una formación uniforme de una película lipídica delgada, lo que permite un mayor rendimiento y biodisponibilidad [4].

Las nanoemulsiones (gotas de tamaño submicro-métrico), también referidas como mini emulsiones [5, 6], son sistemas atractivos para uso en la industria cosmética, farmacéutica, alimentaria y otras, debido a sus propiedades tales como su baja cantidad de surfactante, falta de toxicidad o características irritantes, baja viscosidad, buena apariencia y versatilidad de formulación como espumas, cremas, líquidos y aerosoles.

Las nanoemulsiones son una clase de emulsiones con un tamaño de gota entre 20 y 500 nm [7]. Sus gotas están estabilizadas por surfactantes. Sus propiedades dependen no solo de las condiciones termodinámicas, sino también de los métodos de preparación y el orden de adición de los componentes [8, 9]. Los diferentes rangos de tamaño para las nanoemulsiones encontradas en la literatura, se establecen, generalmente, según criterios basados en propiedades ópticas, ya que no hay un cambio drástico en las propiedades fisicoquímicas cuando el tamaño de las gotas de la emulsión disminuye de micrómetros a la escala de nanómetros [10].

2. Generalidades de las emulsiones

2.1. Estabilidad de las emulsiones

Las emulsiones en general, incluyendo las nanoemulsiones, presentan inestabilidad termodinámica debido al hecho de que la energía libre ΔG_f asociada con su formación es mayor que cero. Este cambio de energía libre se debe principalmente al aumento del contacto entre los dos líquidos inmiscibles: $\Delta G_f = \Delta A\gamma$, donde ΔA es el incremento del área interfacial y γ es la tensión interfacial. Por lo tanto, el área interfacial tiene una tendencia a disminuir espontáneamente, favoreciendo así la floculación y coalescencia de las gotas. Por otro lado, una vez formadas, las nanoemulsiones tienden a tener muy buena

estabilidad cinética, porque su pequeño tamaño de gota reduce la tasa de separación gravitacional y la agregación de gotas [11].

Aunque las nanoemulsiones son estables a la sedimentación o la formación de crema (el movimiento browniano supera la gravedad debido al tamaño pequeño), pueden experimentar floculación, coalescencia y/o maduración de Ostwald, este último es el principal proceso de descomposición de las nanoemulsiones [12, 13].

La maduración de Ostwald consiste en la difusión de moléculas de la fase dispersa desde pequeñas a grandes gotas, a través de la fase continua, como consecuencia de sus diferentes presiones de Laplace. Sin embargo, con la selección apropiada de componentes del sistema, composición y método de preparación, se pueden lograr nanoemulsiones con alta estabilidad cinética. Las nanoemulsiones, al ser emulsiones (sistemas termodinámicamente inestables), requieren un aporte de energía para su formación, que puede ser externa (métodos de dispersión o de alta energía) o interna (métodos de condensación o de baja energía) [14].

Las nanoemulsiones son sistemas particularmente atractivos para su aplicación en cuidado personal y cosméticos así como en el cuidado de la salud debido a las siguientes ventajas [15]:

- El tamaño de gota muy pequeño causa una gran reducción en la fuerza de gravedad y el movimiento browniano puede ser suficiente para superar la gravedad. Esto significa que no se produce cremosidad ni sedimentación durante el almacenamiento.
- El pequeño tamaño de gota también evita cualquier floculación de las gotas y esto permite que el sistema permanezca disperso sin separación de las fases.
- El pequeño tamaño de las gotas también evita su fusión, ya que estas gotas son no deformables y, por lo tanto, se evitan las fluctuaciones de la superficie. Además, el espesor significativo de la película de tensioactivo (en relación con el radio de la

gota) evita el adelgazamiento o la interrupción de la película líquida entre las gotas.

- Las nanoemulsiones son adecuadas para la administración eficiente de ingredientes activos a través de la piel. La gran superficie del sistema de emulsión permite una rápida penetración de los activos.
- La naturaleza transparente del sistema, su fluidez (a concentraciones razonables de aceite), así como la ausencia de espesantes, pueden darles un carácter estético agradable y sensación en la piel.
- A diferencia de las microemulsiones (que requieren una alta concentración de tensioactivo, generalmente en la región del 20 % m/m o más), las nanoemulsiones se pueden preparar utilizando concentraciones razonables de tensioactivo. Para una nanoemulsión de 20 % m/m aceite en agua (O/W) en inglés Oil in Water, puede ser suficiente una concentración de surfactante en la región de 5 a 10 % m/m.
- El pequeño tamaño de las gotas les permite depositarse uniformemente sobre sustratos; la humectación, la dispersión y la penetración también pueden mejorarse debido a la baja tensión superficial de todo el sistema y la baja tensión interfacial de las gotas (O/W).
- Las nanoemulsiones pueden ser empleadas en la encapsulación de fragancias, al ser incorporadas en productos de cuidado personal, para su posterior liberación durante la aplicación del producto utilizado. Esto también podría aplicarse en la formulación de perfumes sin alcohol.
- Las nanoemulsiones se pueden aplicar como sustitutos de los liposomas y las vesículas (que son mucho menos estables) y en algunos casos es posible construir fases cristalinas líquidas lamelares alrededor de las gotas de nanoemulsión.

Estas características mencionadas, tamaño de gota extremadamente pequeño, baja cantidad de

surfactante, baja toxicidad y viscosidad, las hacen atractivas y una excelente opción para aumentar la efectividad dérmica y transdérmica, debido a la transferencia rápida de principios activos a través de la piel, de los ingredientes activos utilizados en la industria cosmética y cosmeceutica.

Cuando hablamos de cosméticos nos referimos a los artículos destinados a ser frotados, vertidos, rociados, introducidos o aplicados al cuerpo humano para limpiar, embellecer, promover el atractivo o alterar la apariencia. Por ejemplo, humectantes para la piel, perfumes, barras de labios, esmaltes de uñas, preparaciones de maquillaje facial y para ojos, champús limpiadores, ondas permanentes, tintes para el cabello y desodorantes, así como cualquier sustancia destinada a ser utilizada como componente del producto cosmético. Así lo define la Ley Federal de Alimentos, Medicamentos y Cosméticos (Ley FD&C) [16].

En este artículo, además de las nanoemulsiones en cosméticos, también se incluyen los productos cosmeceúticos, los cuales fueron definidos por Kligman como, una clase de productos con acción intermedia entre productos cosméticos y productos farmacéuticos. Por lo tanto, los cosmeceúticos no son una clase restringida al adorno, sino como productos tópicos que promueven cambios tanto estructurales como funcionales en la piel, las membranas mucosas y sus uniones sin reclamo terapéutico, pero con posible acción preventiva [16, 17].

2.2. Diferencia entre nanoemulsión y microemulsión

Cuando se habla sobre nanoemulsión, es importante aclarar una confusión que a menudo se puede presentar entre lo que son las nanoemulsiones y microemulsiones [11].

Tanto las microemulsiones como las nanoemulsiones son sistemas coloidales que resultan de la dispersión de dos líquidos inmiscibles, y el sistema disperso formado presenta gotas finas con tamaños por debajo de 100 y 200 nm, respectivamente [18, 19]. Pero ambas poseen el mismo aspecto macroscópico (transparente o translúcido) [20] (Figura 1). En algunos casos, la estructura y morfología de las microemulsiones puede ser muy



(a) microemulsión



(b) nanoemulsión

Figura 1: Imagen de una microemulsión y una nanoemulsión, ambas constituidas por un surfactante no iónico, cosurfactantes, agua y aceite mineral, formuladas para uso cosmético

cercana a las nanoemulsiones, es decir, cuando se trata de microemulsiones aceite en agua (O/W) o agua en aceite (W/O) en forma de micelas esféricas hinchadas, como las describió Schulman y colaboradores [21].

Schulman y colaboradores [21] también encontraron que las principales características de las microemulsiones en comparación con las soluciones micelares no sólo eran la hinchazón excesiva y la baja curvatura (asociada con la baja tensión), sino también la presencia de una estructura de interconexión entre las gotas. Al intentar diluir estos sistemas, encontraron que la estructura de la microemulsion se ve ampliamente afectada, perdiendo así sus características originales, mientras que en las nanoemulsiones no hay una afectación en el tamaño de las gotas, ni en la distribución del tamaño de estas [22, 23, 24].

Una diferencia importante entre las microemulsiones y las nanoemulsiones, es su estabilidad termodinámica. Como casi todos los sistemas emulsionados, existen en un estado termodinámico metaestable, en lugar de en el estado con la energía libre más baja. Sin embargo, debido al pequeño tamaño de las gotas (que reduce la separación gravitacional y la agregación de las gotas), el proceso principal que induce su desestabilización es la maduración de Ostwald.

Este factor da como resultado la estabilidad de las nanoemulsiones durante meses e incluso más si los aditivos específicos (inhibidores de la maduración) ralentizan la transferencia de aceite entre gotas. Por otro lado, las microemulsiones son sistemas estables desde un punto de vista termodinámico. Se forman como resultado del equilibrio entre aceite, agua y tensioactivos, es decir, se mezclan todas las fases de manera homogénea, sea cual sea el orden de introducción, y la mezcla se sella y se pone a temperatura constante hasta alcanzar el equilibrio [11].

Ambos sistemas poseen distinta cantidad de tensioactivo. Generalmente las microemulsiones poseen un contenido de surfactante superior al 20 %, lo que permite su formación espontánea [20], mientras que las nanoemulsiones están constituidas por una menor cantidad de tensioactivos (entre el 3 % y el 10 %) [25].

3. Fabricación de nanoemulsiones

Desarrollar productos seguros, estables, eficientes y atractivos, con un beneficio de costo óptimo para los consumidores, siempre es un desafío para la industria cosmética. Los aspectos de seguridad y medioambientales, la productividad y la calidad deben considerarse muy temprano en el proceso de desarrollo de nuevos productos [4].

Las nanoemulsiones ofrecen una gran versatilidad, incluida la selección del proceso de fabricación y la selección de compuestos, como tensioactivos, lípidos e ingredientes activos [26].

La selección de un proceso apropiado para un sistema en particular depende de la capacidad de ampliación (facilidad de escalar a un nivel industrial de mayor capacidad de producción), reproducibilidad y optimización del tiempo de fabricación.

La elección del método más apropiado depende principalmente de la composición del sistema y / o los requisitos de ampliación [4].

En cosmética, las nanoemulsiones se pueden obtener mediante procesos de alta o baja energía (respectivamente, entrada de energía externa e interna) [4].

3.1. Métodos de alta energía

Se puede utilizar una amplia gama de métodos de emulsión para producir nanoemulsiones, la homogeneización de alto flujo (es decir, alta energía) proporciona una ruta simple para formar gotas a nanoescala en las que la cizalladura aplicada externamente y / o el flujo elongacional superan las tensiones viscosas internas e internas para romper las gotas más grandes en gotas más pequeñas, los ejemplos incluyen homogeneización microfluídica a alta presión [27] y emulsión ultrasónica [28].

En la homogeneización a alta presión, la presión de operación es de hasta 150 MPa para producir nanoemulsiones con gotas de menor tamaño. Este método tiene la ventaja de una fácil escalabilidad en la producción industrial [16, 29].

La técnica de emulsión de membrana directa, en la cual se emplean membranas de vidrio poroso Shirasu® estándar, se usa para preparar nanoemulsiones con un tamaño uniforme. En este método, la fase dispersa es forzada a través de la membrana hacia la fase continua [16, 30].

La emulsión ultrasónica, también conocida como emulsión acústica, es un método de alta energía que utiliza ondas de sonido en una frecuencia superior a 20 kHz. Este método da como resultado nanoemulsiones con bajo tamaño y baja polidispersidad, además de ser rápido [16].

La microfluidización es un método de homogeneización de alta energía que es aplicable en las operaciones de la industria, debido al control flexible del tamaño de gota de la emulsión, que proporciona, y a su capacidad de producir emulsiones finas a partir de una amplia diversidad de materiales como vitaminas, lípidos bioactivos, drogas, antioxidantes y sabores [27].

En la industria cosmética se utilizan varios dispositivos de homogeneización industriales de alta presión diferentes como: GEA Niro-Soavi Spa (GEA Niro-Soavi Spa, Parma, Italia) de L'Oreal [31, 32] O Boticario [33] y Microfluidizador de Microfluidics Corp. (Newton, Massachusetts, Estados Unidos) por Shiseido [34].

3.1.1. Proceso y componentes para la formación de nanoemulsiones a alta energía

La fabricación de nanoemulsiones generalmente se realiza en dos pasos y, a veces, en tres pasos, con un paso de dilución adicional para aumentar la productividad o funcionalizar el producto.

La Figura 2 muestra que el primer paso para preparar una nanoemulsión O/W mediante un método de alta energía es preparar una macroemulsión O/W, que generalmente se logra mezclando aceite, agua y surfactante en un sistema de agitación por lotes simple, usando una herramienta de corte clásica (por ejemplo, un rotor o mezclador), para un período de tiempo suficiente [4].

En el segundo paso, la macroemulsión se convierte en una nanoemulsión. A través de un homogeneizador, una bomba de alta presión empuja la macroemulsión a través de un espacio estrecho (la altura del espacio es del orden de unas pocas micras), donde las gotas grandes se rompen en gotas más pequeñas, cuando se someten a un esfuerzo de cizallamiento y alargamiento extremo. El proceso de homogeneización se repite típicamente varias veces (denominado número de pasadas) hasta que el tamaño de la gota se vuelve constante. En un ultrasonificador, las ondas de choque de alta energía crean turbulencia (debido a la cavitación) que rompe las gotas, hasta que el tamaño de las mismas se vuelve constante [35, 36, 37, 38, 39].

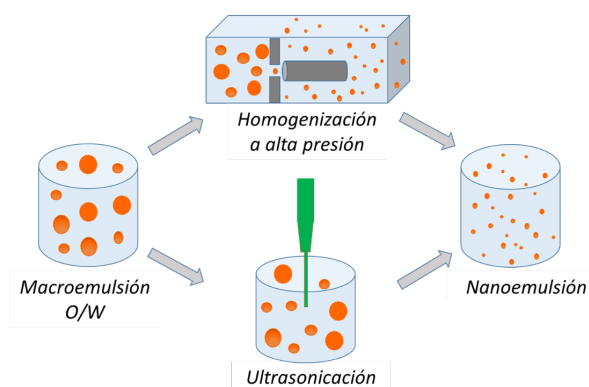


Figura 2: Descripción general del método de alta energía para preparar nanoemulsión O/W. La alta energía, como la homogeneización a alta presión (HPH) y la ultrasonificación, rompen las gotas de microemulsión en gotas más pequeñas. Modificado de [35]

3.1.2. Parámetros de formulación

Aceites: se puede usar una gran variedad de aceites en cosméticos dependiendo de los beneficios específicos: emolencia y sensación de riqueza, solubilización activa y biodisponibilidad, desmaquillante, volatilidad, sensación de luz, brillo, etc. Algunos de los aceites utilizados para preparar nanoemulsiones cosméticas son: aceite de aguacate, miristato de isopropilo, isododecano, isohexadecano, vaselina, etc. [4].

Poliolios: los poliolios son ingredientes clásicos en cosmética, donde se usan como humectantes, potenciadores de la penetración para ingredientes activos, solventes, etc. También pueden verse como colaboradores de formulación para reducir el tamaño de las gotas y la transparencia del producto formulado durante el proceso de homogeneización [4].

Un ejemplo de la acción de los poliolios se evidencia en el dipropilenglicol. Este poliol ejerce un impacto positivo sobre la transparencia de la nanoemulsión: ocurre una disminución en la diferencia del índice de refracción entre la fase oleosa y acuosa. Se presenta un aumento en la viscosidad de la fase acuosa de 1,8 cP en una formulación sin dipropilenglicol a 4,0 cP con dipropilenglicol al 10 % [4].

Tensoactivos: en cosméticos, se puede usar

una amplia variedad de tensoactivos para obtener nanoemulsiones a través de la homogeneización.

Éstos incluyen (a) tensioactivos no iónicos clásicos tales como alcoholes grasos etoxilados o ácidos grasos, ésteres grasos de sacarosa, poliglucósidos de alquilo y ésteres de poliglicerol; (b) oligómeros anfifílicos; y (c) mezclas de alcoholes grasos y tensioactivos o fosfolípidos [4].

Estos métodos de alta energía tienen una serie de ventajas que los han llevado a ser ampliamente utilizados en procesos industriales, como su versatilidad y alto rendimiento y ofrece a los formuladores la oportunidad de crear productos nuevos y atractivos que respondan a los requisitos técnicos, toxicológicos y ambientales de los productos cosméticos (Tabla 1). Sin embargo, los métodos de alta energía también tienen una serie de limitaciones: (i) El proceso generalmente implica varios pasos, que incluyen la dispersión, la premezcla y la homogeneización; (ii) existen necesidades de alta energía; (iii) existe un riesgo potencial de degradación o desnaturalización de moléculas frágiles en la formulación; y (iv) existen altos costos asociados con la compra, mantenimiento y operación del equipo. En consecuencia, ha habido interés en métodos de emulsión alternativos, como los métodos de baja energía, que permiten la formulación de nanoemulsiones muy pequeñas y monodispersas sin necesidad de ningún equipo especializado [4, 11].

3.2. Métodos de baja energía

Los métodos de emulsión de baja energía, hacen uso de la energía química interna del sistema, a menudo son más eficientes energéticamente ya que solo se necesita agitación simple, y generalmente permiten producir un tamaño de gota más pequeño que los métodos de alta energía [48]. Sin embargo, dependiendo del sistema y las variables de composición, se pueden lograr tamaños de gota similares por ambos tipos de métodos [49].

La formación de nanoemulsión desencadenada por la rápida difusión de las moléculas de surfactante y/o solvente desde la fase dispersa a la fase continua sin que implique un cambio en

Tabla 1: Algunas nanoemulsiones con aplicaciones cosméticas y cosmeceúticos, elaboradas por métodos de alta energía

Fase dispersa	Aplicación cosmética	Método	Referencia
Toxina botulínica, aceite insaturado de soya, girasol y almendra	Nanoemulsiones que comprenden toxinas botulínicas para el tratamiento cosmético y médico de estados de contractura muscular	Microfluidización	Edelson y Nicolsi (2016) [40]
Péptidos, almendra, aceite de aguacate	Fórmula para incorporar péptidos cortos (de 2 a 30 aminoácidos) con efectos cosméticos y terapéuticos beneficiosos sobre la piel.	Microfluidización	Edelson y Kotyla (2016) [41]
Polisacáridos de Agave sisalana, Isostearyl neopentanoato, etilhexil palmitato	Fórmula para incorporar polisacáridos de Agave sisalana como materia prima cosmética hidratante	Ultrasonificación	Barreto (2017) [42]
Coenzima Q10, miristato de isopropilo	Fórmula para incorporar coenzima Q10 para mejorar la permeabilidad da la piel mediante aplicación tópica.	Ultrasonificación	El-Leithy (2018) [43]
Carotenoides microbianos, aceite de burití y vitamina E	Mejorar la estabilidad y aumentar el factor de protección solar en las nanoemulsiones foto protectoras	Ultrasonificación	Mansur (2020) [44]
Coenzima Q10, aceite de copaiba	Proteger los queratinocitos contra los daños oxidativos y en la dermis para estimular la proliferación de fibroblastos y colágeno	Ultrasonificación	Nigro (2019) [45]
Coenzima Q10, aceite de linaza, aceite de onagra y aceite de oliva.	Desarrollar una crema de nanoemulsión de coenzima Q10	Homogeneización con un mezclador de alto cizallamiento	Tou (2019) [46]
Alcohol graso	Desarrollo de una formulación más transparente que una loción lechosa convencional	Homogeneización a alta presión	Okamoto (2016) [34]
Tocomin [®] , miristato de isopropilo	Formulación para mejorar el suministro de eficacia de compuestos naturales preventivos /quimioterapéuticos	Homogeneización Ultra Turrax-10	Brownlow (2015) [47]

la curvatura espontánea del surfactante se conoce como “autoemulsión” [10].

Cuando se producen cambios en la curvatura espontánea del surfactante durante el proceso de emulsión de negativo a positivo (para obtener emulsiones O/W) o viceversa (para emulsiones W/O), se designan como métodos de “inversión de fase”. Estos se clasifican como métodos de temperatura de inversión de fase (en inglés, Phase Inversion Temperature, PIT) y composición de inversión de fase (en inglés, Phase Inversion Composition PIC) si la emulsión se desencadena por un cambio en la temperatura o la composición, respectivamente [10].

3.2.1. Formación de nanoemulsión por métodos de autoemulsión

La emulsión se crea como resultado de una mezcla de dos líquidos a temperatura ambiente. Uno es una fase acuosa pura, el otro es una mezcla de aceite, surfactante y un solvente miscible en agua. El método de autoemulsión o emulsión espontánea hace uso de la energía química liberada debido a un proceso de dilución con la fase continua, sin que se produzca ninguna transición de fase (sin cambio en la curvatura espontánea del tensioactivo) en el sistema durante la emulsión [10, 50].

La emulsión espontánea se produce por diferentes mecanismos que parecen verse afectados por la composición del sistema, las características fisicoquímicas y el protocolo de emulsión

(es decir, la forma en que se añaden los componentes y cómo se modifican las propiedades termodinámicas del sistema). En primer lugar se propusieron tres posibles mecanismos principales: dos de ellos implicaban la rotura mecánica de la interfase debida, en un caso, a la intensidad de la turbulencia interfacial y, en el otro, a la existencia de valores negativos de tensión interfacial. El criterio de tensión interfacial negativa es una simplificación excesiva porque otros factores además de la tensión (por ejemplo, fuerzas eléctricas en capas dobles) pueden influir significativamente en la estabilidad cuando la tensión es baja (menos de aproximadamente 1 mN/m). Por tanto, este segundo mecanismo se describe mejor como inestabilidad mecánica de las interfaces de baja tensión. El tercer mecanismo fue llamado “difusión y varado” y es completamente diferente de los dos anteriores porque involucra una inestabilidad química en lugar de mecánica. La idea básica en este caso es que las regiones de sobresaturación local son producidas por el proceso de difusión y las gotitas de emulsión se forman debido a la transformación de fase en estas regiones. La sobresaturación cerca de una interfaz también puede promover su ruptura por un mecanismo de inestabilidad química distinto, pero estrechamente relacionado [51].

Por lo tanto, al diluir una microemulsión o una mezcla de disolvente, tensioactivo y / o cosurfactante, se produce la difusión de los componentes miscibles en agua, desde la fase orgánica, hacia la fase acuosa, lo que induce una gran turbulencia en la interfase agua / aceite, lo que resulta en un aumento dramático de la área interfacial, dando lugar al estado de emulsión metaestable, haciendo que se formen gotas nanoescaladas (nanoemulsiones O/W) [10, 52].

Según el tipo de nanopartícula requerida, la formulación también puede incluir componentes adicionales tales como tensioactivos, monómeros, polímeros, macromoléculas y / u otros ingredientes activos. Aunque estas adiciones pueden causar una ligera interferencia con el proceso, los mecanismos a nivel general permanecerán sin cambios [50, 52].

La formación de nanoemulsiones por au-

toemulsión, a través de la dilución de microemulsiones O/W empleando un alcohol como cosurfactante, es debido a la difusión del alcohol en la interfase de las gotas, hacia el agua tras el proceso de dilución [10].

Como consecuencia, la microemulsión, ahora es termodinámicamente inestable, ya que la concentración de tensioactivo no es lo suficientemente alta, como para mantener la tensión interfacial muy baja requerida ($\gamma < 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$) para la estabilidad termodinámica, convirtiéndose en una nanoemulsión (Figura 3) [10].

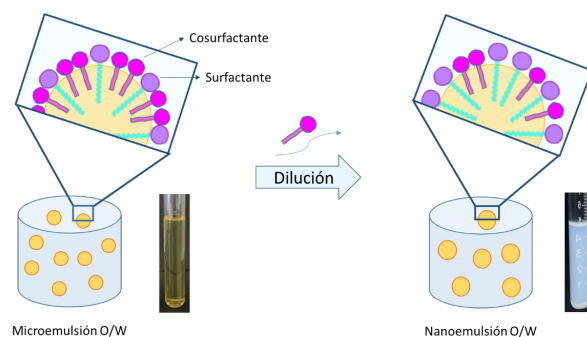


Figura 3: Representación esquemática del mecanismo propuesto para la autoemulsión por dilución de una microemulsión O/W: por dilución con agua, el cosurfactante difunde de la interfase aceite / agua a la fase acuosa. Modificado de [10]

Las nanoemulsiones también se pueden formar mediante la dilución de agregados tensioactivos distintos de las microemulsiones. De hecho, la formación de nanoemulsiones O/W por dilución directa a partir de una fase cristalina líquida cúbica con estructura (Pm3n), en sistemas mixtos de tensioactivos no iónicos / iónicos [49, 53]. Estas fases cristalinas Pm3n, es un tipo de estructura micelar basada en agregados micelares discretos [54].

Durante la dilución, las micelas que se empaquetaron en la red cúbica se separan, interrumpiendo la estructura cúbica, y al mismo tiempo una parte del tensioactivo que estabilizaba la interfase puede migrar a la fase acuosa en el seno del líquido, desestabilizando una parte de la interfase, dando pie a la formación de las gotas finales de nanoemulsión (Figura 4). Vale la pena señalar que no se produce ningún cambio en la

curvatura espontánea del tensioactivo durante la etapa de dilución [10].

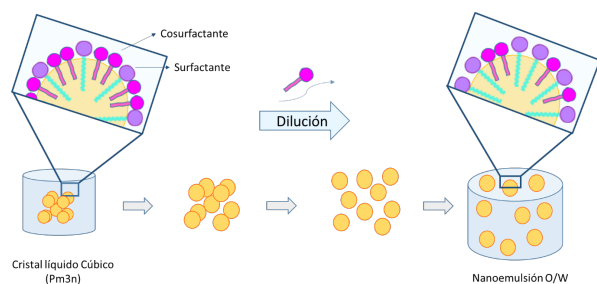


Figura 4: Representación esquemática del mecanismo propuesto para la formación de nanoemulsiones O / W por dilución directa a partir de una fase cristalina líquida cúbica con estructura Pm3n, en sistemas mixtos de tensioactivos no iónicos / iónicos. Modificado de [10]

Se obtienen nanoemulsiones con un tamaño de gotas pequeño, independientemente de la composición de la microemulsión y el procedimiento de dilución utilizado. Adicionalmente, no se presentan cambios en la curvatura del surfactante durante el proceso.

El procedimiento de dilución empleado por Solé y colaboradores [55] mostró que se pueden obtener nanoemulsiones, por dilución de microemulsiones de aceite en agua (O/W) y agua en aceite (W/O). Además, tanto la velocidad de adición como el orden de adición de la microemulsión o del agua, producen nanoemulsiones.

A partir de microemulsiones O/W, se obtienen nanoemulsiones con diámetros de gota de 20 nm, independientemente de la composición de microemulsión y el procedimiento de dilución utilizado. A partir de microemulsiones W/O, las nanoemulsiones sólo se obtienen si las condiciones de emulsión permiten alcanzar el equilibrio en un dominio de microemulsión O/W durante el proceso [55].

Pereira y col [56], evaluaron una metodología que plantea ser una herramienta útil y sencilla para la evaluación del desempeño de la emulsión espontánea. La metodología de la gota permite la evaluación de sistemas surfactante-aceite-agua, en procesos de emulsión espontánea que resultan en desempeños que van desde muy bueno hasta

malo, con medianas de tamaño de gota 2,3 μm con 28,7 μm , respectivamente.

El procedimiento consiste en colocar con una pipeta Pasteur una gota de aceite en contacto con una gota de la fase acuosa. En el aceite se mezclan los surfactantes y alcoholes en diferentes proporciones de acuerdo con cada sistema. La clasificación de cada sistema fue realizada a través de la inspección visual, empleando las palabras: *muy bueno*, *bueno*, *regular* y *malo*, para calificar el proceso de emulsión observado.

Para el sistema clasificado muy bueno, al colocar en contacto las gotas de ambas fases, se observó la aparición de un color blanquecino, a veces observándose, un movimiento persistente. En el sistema clasificado bueno, cuando transcurren 10 segundos de ocurrir el contacto entre las gotas de ambas fases, se observó la aparición del color blanquecino, la cual persistió por 10 min. En algunos casos puede observarse o no, movimiento en las gotas. El caso regular, mostró cierta evidencia de emulsión, mediante un color ligeramente blanquecino, después del contacto intergota, transcurrido 1 minuto o más. En este caso no hay movimiento en las gotas. El sistema clasificado malo mostró muy poca o ninguna evidencia de emulsión espontánea. Los sistemas fueron observados por un microscopio óptico acoplado con una cámara digital (equipo marca MOTIC) [56].

Este método representa un ahorro en reactivos y proporciona la información adecuada y previa sobre la emulsión del sistema que se desea estudiar.

3.2.2. Formación de nanoemulsión por métodos de inversión de fases

Estos métodos hacen uso de la energía química liberada por las transiciones de fase durante el proceso de emulsión. Estas transiciones de fase a menudo, implican la inversión de la curvatura de la película de surfactante de positiva a negativa o viceversa. Se ha demostrado que las transiciones de estructuras que tienen una película de surfactante con una curvatura cero, (como la fase cristal líquido lamelar o microemulsión bicontinua) juegan un papel importante en la formación de

las nanoemulsiones [57, 58]. La fase laminar o lamelar ($L\alpha$) consiste en bicapas de moléculas de una sustancia anfifílica separadas entre sí por capas de agua. Esta fase líquida cristalina se caracteriza por su relativa fluidez, a pesar de poseer una elevada proporción de tensioactivo [54]. La microemulsión bicontinua es una partición bicontinua en la que cada subvolumen se llena con una composición o fase distinta, no necesariamente uniforme. Las estructuras bicontinuas pueden estar presentes en fases mesomórficas, similares a cristales líquidos, consideradas como dispersiones de esferas, cilindros o láminas [59].

3.2.3. *Método de la temperatura de inversión de fase (PIT)*

El método PIT, introducido por Shinoda y Saito [60], se basa en los cambios en la curvatura espontánea del tensioactivo inducidos por la temperatura.

El método PIT solo se puede aplicar a los tensioactivos sensibles a los cambios de temperatura, es decir, los tensioactivos no iónicos de tipo polioxietileno en los que los cambios de temperatura inducen un cambio en la hidratación de las cadenas de poli (oxietileno) y por consiguiente el cambio de su curvatura [10, 60].

El aceite, el agua y los tensioactivos no iónicos se mezclan todos a temperatura ambiente y se agitan ligeramente. A continuación, la mezcla se calienta gradualmente, como resultado la solubilidad del tensioactivo cambia progresivamente de la fase acuosa a la oleosa. Por encima de la temperatura de inversión de fase, el tensioactivo se solubiliza completamente en aceite y, por lo tanto, la mezcla sufre una inversión de fase, desde una emulsión de aceite en agua (O/W) hasta una emulsión de agua en aceite (W/O) [50, 61].

Estas diferentes estructuras pueden ser fases esféricas, tubulares o de disco, láminas o esponjas y presentan una estabilidad que solo depende de los cambios variables termodinámicos como temperatura, composición y dilución. Las nanoemulsiones se generan instantáneamente realizando una transformación irreversible: un enfriamiento rápido o una dilución repentina con agua fría, a

este sistema mantenido en la PIT o más alto que el mismo [50].

En cuanto al mecanismo de formación, se cree ampliamente que las gotas a escala nanométrica se originan a partir de plantillas nanométricas: Las microemulsiones PIT. Estos últimos simplemente se rompen por el rápido enfriamiento y/o dilución, “congelando” la red de microemulsiones en forma de nanoemulsiones.

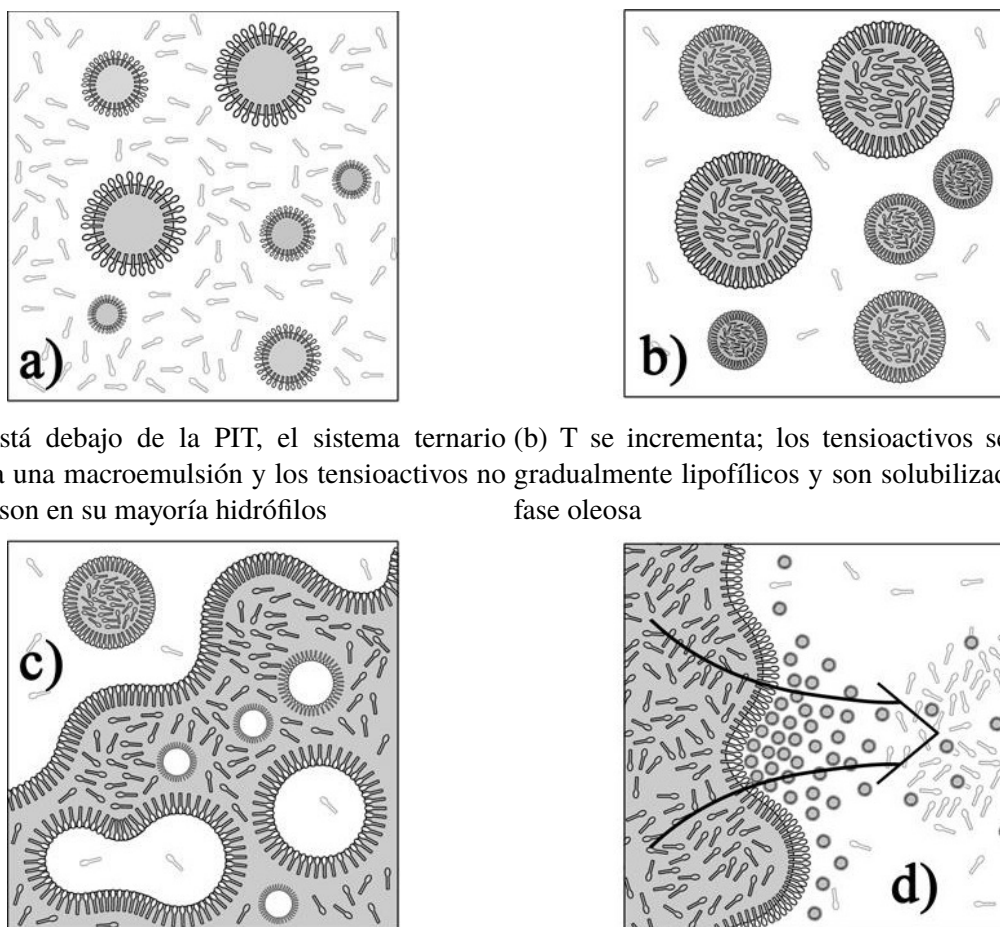
Básicamente, las nanoemulsiones se generan cuando el equilibrio de fase correspondiente es un sistema Winsor III o IV, relacionado a la cantidad de tensioactivo [50].

Este mecanismo, ilustrado en la Figura 5, se puede describir de la siguiente manera: debajo de la PIT, la Figura 5a, se forma una macroemulsión lechosa y la mayoría de los tensioactivos no iónicos se solubilizan en la fase acuosa, de acuerdo con un coeficiente de partición del tensioactivo desplazado hacia la solubilidad en agua [49, 50].

A medida que aumenta la temperatura de la mezcla, Figura 5b, estos anfífilos no iónicos se vuelven hidrofóbicos gradualmente, haciendo que migren dentro de la fase oleosa. Luego, dado que las cantidades de tensioactivo son del mismo orden de magnitud que las del aceite, aumenta la fracción de volumen de la fase dispersa. Además, la curvatura interfacial y la tensión interfacial se reducen, dando lugar a condiciones propicias para el establecimiento de microemulsiones Winsor III o Winsor IV en equilibrio, como se muestra en la Figura 5c, [20, 62, 63, 64, 65].

La temperatura que marca la frontera entre las emulsiones O/W y W/O se llama temperatura de inversión de fase (PIT), la cual está intrínsecamente cerca del punto de turbidez, pero posiblemente cambia según la naturaleza del aceite (para lo cual la solubilidad del surfactante en el aceite puede variar) [11].

Finalmente, cuando la temperatura se incrementa por encima de la PIT, el sistema sufre una inversión de fase y el agua se dispersa en la mezcla de aceite más surfactante (los surfactantes son lipofílicos a esta temperatura). En este punto, después del enfriamiento rápido, se crean nanoemulsiones. Este último paso simplemente recrea las condiciones de emulsión del



(a) T está debajo de la PIT, el sistema ternario (b) T se incrementa; los tensioactivos se vuelven presenta una macroemulsión y los tensioactivos no gradualmente lipofílicos y son solubilizados por la iónicos son en su mayoría hidrófilos fase oleosa

(c) T está en la PIT, se forman microemulsiones bicontinuas (d) La temperatura se eleva por encima de la PIT, la emulsión se invierte y luego el agua se dispersa en la mezcla de aceite y tensioactivo lipofílico

Figura 5: Diagrama del mecanismo de generación de nanoemulsiones utilizando el método PIT. El sistema agua / tensioactivo no iónico / aceite sufre una inversión de fase [50]

procedimiento de emulsión espontánea. El sistema se configura muy rápidamente a una temperatura que cambia drásticamente los coeficientes de partición del tensioactivo, haciéndolos completamente hidrófilos. Como resultado, los anfílicos se mueven espontáneamente del aceite a la fase acuosa, tal como ocurre en la emulsión espontánea. Finalmente, como se muestra en la Figura 5d, se generan nanoemulsiones, debido únicamente a este desplazamiento de materiales hidrofílicos.

La proporción de aceite y tensioactivo solo influye en el tamaño de la nanoemulsión. Puede significar que el mismo mecanismo, estrechamente relacionado con la proporción de aceite tensioactivo, gobierna ambos procesos.

Se deduce que los conceptos involucrados en el procedimiento PIT pueden de hecho ser los mismos que los involucrados en la emulsión espontánea, basados en la rápida difusión de una especie desde la fase oleosa a la acuosa [50].

En la formulación de nanofarmacéutica o cosmética, los métodos de baja energía parecen ser preferidos como un medio para encapsular fármacos frágiles o termosensibles (Tabla 2). Hasta la fecha, estos métodos se clasificaron en diferentes métodos gobernados por diferentes mecanismos.

Este estudio indica que, finalmente, todos estos métodos de baja energía, incluido el método PIT, siguen un mecanismo único y universal controlado por un rápido desplazamiento de los tensioactivos

de la fase oleosa a la acuosa, este fenómeno da lugar a nanoemulsión espontánea [50].

3.2.4. *Papel de los surfactantes no iónicos polietoxilados sobre los métodos de emulsión transitorios*

Los métodos de emulsión de baja energía se basan casi exclusivamente en el uso de surfactantes para los cuales la cabeza polar es una cadena de poli etilenglicol (PEG y tensioactivos PEGilados), que son una forma particular de surfactantes no iónico. Se han utilizado en los métodos de temperatura de inversión de fase (PIT), emulsión espontánea y sistema de administración de fármacos autoemulsionantes, pero su comportamiento global y su papel en estos procesos de emulsión siguen un mecanismo universal [11].

Típicamente utilizados en la formación de nanoemulsiones por emulsión de baja energía son, son el Triolato de sorbitano con 20 moles de polioxietileno (Tween 85) empleado en nanoemulsiones cosméticas y farmacéuticas [66, 67]. El monooleato de polioxietilensorbitano (Tween 80) empleado en nanoemulsiones cosméticas, alimenticias [68, 69, 70]. PEG-4 dodecil éter (Brij 30) [71], estos se observan en la Figura 6.

Todos estos tensioactivos tienen un número relativamente alto de unidades de etilenglicol, o longitud de la cadena PEG, con valores en un rango de tamaño comparable (15-35 por cadena lipídica). Además, todos estos tensioactivos tienen valores de balance hidrofílico-lipofílico (HLB) alrededor de 13-15, que está relacionado con los tamaños relativos de la cabeza polar y la cadena no polar. Las cadenas de PEG más cortas o mucho más largas inducirán una pérdida de solubilidad en agua o actividad superficial, respectivamente [11].

En general, la solubilidad de los tensioactivos etoxilados es inducida, no sólo por las interacciones entre la cadena de PEG y el agua a través de la formación de puentes de hidrógeno, en el seno del agua [74, 75], pero también por la conformación de la cadena PEG que puede crear un momento dipolar localizado (en la conformación cis), la cual mejora las interacciones dipolo-dipolo con el agua [76] y por lo tanto su solubilidad. La

solubilidad de los tensioactivos no iónicos se determina principalmente por las interacciones entre los grupos etoxilados y el agua, y se modifica por el tamaño de los grupos fluctuante (no es una interacción fija). Tales asociaciones se forman por la estructuración de las moléculas de agua, asociadas por enlaces de hidrógeno que envuelve las cabezas polares etoxiladas. Esto se ve afectado en gran medida por los cambios de temperatura, disminuyendo fuertemente la solubilidad con el calentamiento, porque la excitación térmica de las moléculas de agua reduce sus interacciones con los grupos de óxido de etileno [11].

Estas interacciones, son responsables del fenómeno llamado punto de enturbiamiento o punto de nube, también de la separación del tensioactivo no iónico de la mezcla, dando lugar a una fase rica en tensioactivo en equilibrio con una fase acuosa con concentración de tensioactivo próxima a la CMC. Además, son responsables del fenómeno de la inversión de fase de una emulsión [11].

Si el uso de tensioactivos no iónicos suele ser necesario para obtener una emulsión de baja energía, la elección de la fase de aceite también es muy importante para el éxito del proceso. Los métodos de emulsión de transición utilizados para producir nanoemulsiones se basan en cambios en las interacciones relativas de los tensioactivos PEGilados con las fases de aceite y agua y particularmente en la posibilidad de modificar estas interacciones usando variables termodinámicas [11].

3.2.5. *Método de composición de inversión de fase (PIC)*

En el método PIC, las transiciones de fase son inducidas por cambios en la composición durante la emulsión, a temperatura constante representada esquemáticamente en la Figura 7. En consecuencia, se puede aplicar a tensioactivos que no sean de tipo etoxilado.

Para el método PIC, al igual que para el PIT, es común encontrar las transiciones de fase (fases cristalinas líquidas laminares o microemulsiones bicontinuas) durante el proceso de emulsión que conduce a la formación de nanoemulsiones, lo que

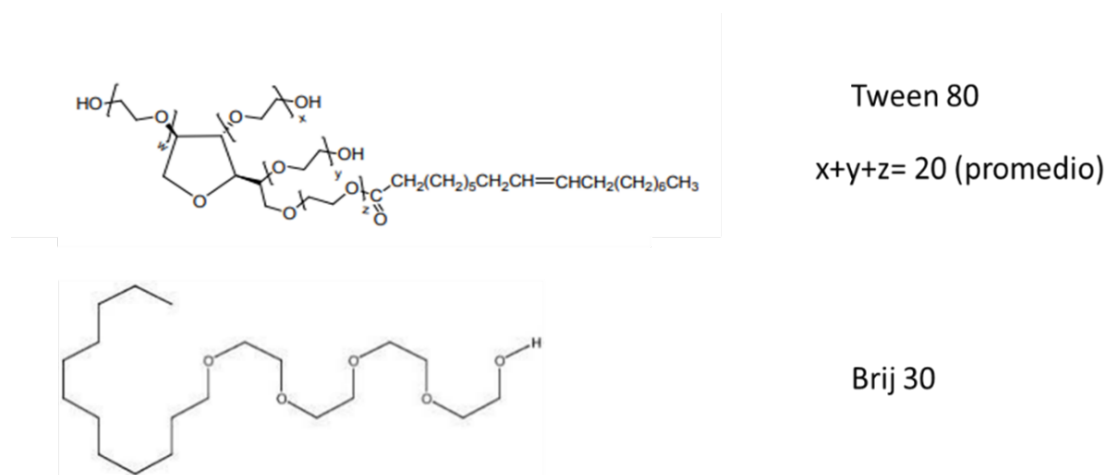


Figura 6: Algunos surfactantes no iónicos empleados en la emulsión transicional [72, 73]

implica que se rigen por los mismos mecanismos [10].

El procedimiento para obtener nanoemulsiones por el método PIC consiste en agregar progresivamente uno de los componentes (agua o aceite) sobre una mezcla de los otros dos componentes (surfactante de aceite o surfactante de agua, respectivamente [77, 78].

Se considera que el método PIC tiene un mayor potencial para una producción a gran escala que el PIT porque es experimentalmente más fácil agregar un componente a un gran volumen de emulsión que producir un cambio repentino de temperatura. Además, también se prefiere el método PIC cuando se trata de componentes con problemas de estabilidad de temperatura. Además, como se discutió anteriormente, este método no está restringido a los tensioactivos de tipo POE [10].

El sistema inicial, generalmente, es una microemulsión de agua en aceite, cuando se agrega agua progresivamente a la fase oleosa para formar una nanoemulsión O/W. A medida que aumenta la fracción de volumen de agua, el grado de hidratación de las cadenas POE del tensioactivo aumenta progresivamente, y la curvatura espontánea del tensioactivo cambia de negativo a cero. Alrededor de esta composición de transición, las propiedades tensioactivas hidrofílicas-lipofílicas están equilibradas, como a la temperatura HLB. En consecuencia, se forman estructuras bicontinuas

o lamelares. Cuando se excede la composición de transición, las estructuras con curvatura cero se separan en pequeñas gotas directas (O/W) metaestables que aún contienen el aceite, y tienen un diámetro muy pequeño, lo que implica una curvatura positiva muy alta de la capa tensioactiva [10].

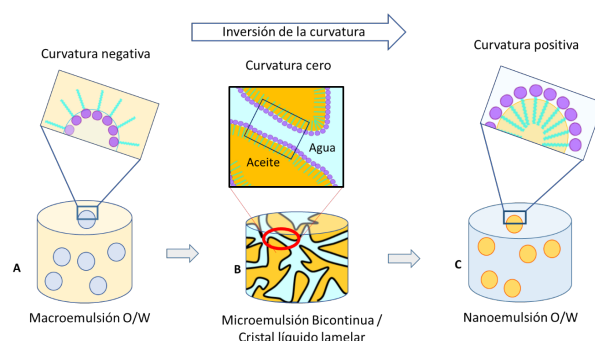


Figura 7: Representación esquemática de la formación de nanoemulsiones por el método PIC [10]

4. Concepto de variable de formulación generalizada: SAD y HLD

Cuando se formula una emulsión se tiene una gran cantidad de variables a tomar en cuenta. Todas las propiedades de la emulsión, como por ejemplo, el tamaño de gota son influenciados por estas variables de formulación. Desde finales de los años 70 se logró desarrollar un concepto generalizado

Tabla 2: Algunas nanoemulsiones con aplicaciones cosméticas y cosmeceúticos, elaboradas por métodos de baja energía

Fase dispersa	Aplicación cosmética	Método	Referencia
Tegosoft G20 (octildodecanol)	Fórmula para incorporar ceramidas IIB con efectos cosméticos beneficiosos sobre la piel.	PIC	Su, R. (2017) [79]
Extractos vegetales	Nanoemulsiones como vehículo para la aplicación tópica con potencial hidratación y untuosidad.	PIT	Rocha-Filho (2017) [80]
Extracto de quercetina	Nanoemulsiones para aplicación como acondicionador de cabello Desarrollo de un nanogel cargado de catequina para la protección de la piel contra el foto daño inducido por la radiación UV	PIT	Dario (2016) [81]
Catequinas		Emulsión espontánea	Harwansh (2016) [70]
Monooleato de sorbitan, lanolina acetilada	Desarrollo de formulaciones no son tóxicas como portadores para aplicaciones farmacéuticas y cosméticas.	Inversión de fase	Pereira (2016) [82]

de formulación llamado desviación hidrofílica-lipofílica (SAD) o su expresión adimensional, desviación hidrofílica-lipofílica (HLD) [83]. Este concepto fue desarrollado en base al barrido unidimensional de sistemas surfactante-aceite-agua, donde se cambia una sola variable mientras que las otras se mantienen constantes. El concepto del HLD corrige de alguna manera y toma en cuenta las deficiencias de las teorías del HLB y el PIT, y las relaciones de Winsor. Es una ecuación que relaciona las variables más importantes de formulación de un sistema SOW, tales como la salinidad de la fase acuosa, la fase aceite, los alcoholes, la temperatura, presión y estructura del surfactante. Ha sido empleado para formular emulsiones y microemulsiones, para romper emulsiones, para caracterizar surfactantes, fases aceites, modular tamaño de gota en emulsiones, entre otras aplicaciones. La ecuación del HLD resulta en una suma algebraica de las relaciones energéticas de los diferentes variables de formulación, y se expresa según la ecuación (1).

$$HLD = \alpha - EON - kEACN + \phi(A) + bS + C_T(T - 25) \quad (1)$$

Esta expresión corresponde para los surfactantes no iónicos del tipo etoxilado. Donde S es la salinidad de la fase acuosa (S expresa el porcentaje

en peso de cloruro de sodio), ACN es el número de átomos de carbono del alcano, como una medida de la lipofílicidad de la fase aceite, $\phi(A)$ es una función del tipo y concentración de alcohol y T la temperatura en °C. La constante k depende del grupo hidrofílico del surfactante y aT es un coeficiente de temperatura. Donde α depende del grupo lipofílico del grupo surfactante, EON es el número de grupo de óxidos de etileno por molécula surfactante y $\phi(A)$ depende de la concentración y naturaleza del alcohol. El parámetro b depende del tipo de electrolito; k y C_T son constantes.

Una aplicación importante es el uso de este concepto para remediar suelos contaminados con petróleo. Pérez y colaboradores hicieron formulación que mostró el 90 % del desempeño en la solubilización de petróleo que estaba impregnado en un suelo de la zona de Yaracal, Edo. Falcón, Venezuela. El barrido de salinidad empleado fue calculado para tomar en cuenta la fase aceite a remover y así lograr minimizar el uso de solventes orgánicos [84].

5. Diversas nanotecnologías cosméticas

La piel humana es el órgano más grande del cuerpo, compuesto por distintas capas, proporcionando, como función principal, una protección al cuerpo de los daños ambientales [1].

La aplicación cosmética se produce principalmente en la superficie de la piel y, por tanto, la eficacia clínica del producto se basa a menudo en la difusión de las sustancias activas a través de la capa de la epidermis. La principal barrera para la penetración de sustancias a través de la piel es el estrato córneo, la capa más externa de la epidermis, que está en contacto directo con el medio ambiente [16].

Partiendo de la capa más externa de la piel, el estrato córneo (SC) de la epidermis está formado por un conjunto de células queratinizadas y anucleadas dispuestas planas unas contra otras. Estas células se recogen en 10 - 20 capas de células rodeadas de material lipídico extracelular. (Figura 8) Esto confiere a la superficie cutánea una importante característica estructural y organizativa, así como una propiedad hidrofóbica, siendo estos los factores clave para su función protectora y, también, para el control selectivo de la permeabilidad cutánea. Debido a estas características, algunas sustancias apenas penetran a través de la piel por difusión pasiva en cantidades suficientes para alcanzar niveles terapéuticos [16, 85, 86].

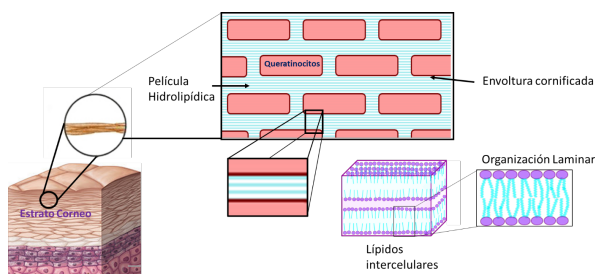


Figura 8: Esquema del estrato córneo (SC) de la epidermis

Hay varias vías posibles para que las moléculas penetren a través de la barrera cutánea y, en general, se consideran tres vías principales. En primer lugar, la vía intercelular más conocida se produce por difusión molecular a través de capas de lípidos entre la interfase de los corneocitos. En segundo lugar, la vía folicular con su densa red de capilares sanguíneos también actúa como un “reservorio” del componente activo. En tercer lugar, la vía transcelular que implica el transporte molecular

directamente a través de los corneocitos y las capas de lípidos [4, 87, 86].

Debido a estas características, algunas sustancias apenas penetran a través de la piel por difusión pasiva en cantidades suficientes para alcanzar niveles terapéuticos. En este contexto, la nanotecnología es fundamental en el desarrollo de estrategias que permitirían una mayor penetración de activos por vía transepidérmica, como las nanoemulsiones [16].

5.1. Otras nanotecnologías aplicadas en cosméticos

Además de las nanoemulsiones, hay otro tipo de nanosistemas empleados en el campo cosmético, como nanoesferas, nanocápsulas, nanopartículas de lípidos sólidos (SLNP), liposomas, ciclodextrinas y micelas. Cada uno de ellos presenta peculiaridades que son importantes conocer (Figura 9) [87, 88].

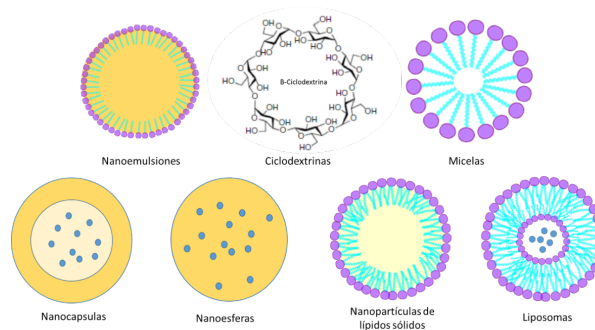


Figura 9: Diagrama de algunas nanotecnologías aplicadas en cosméticos. Modificado de Dutta 2020 [89] y Dhawan 2020 [90]

5.1.1. Ciclodextrinas

Las ciclodextrinas (CD), también conocidas como cicloamilosas, cicloamilosas, o γ -dextrina de Schardinger [91], son oligosacáridos cíclicos de origen natural, obtenidos de fuentes renovables, compuestos por unidades de D-(+)-glucopiranosas unidas por enlaces α -1,4 [16].

Existen naturalmente tres tipos de CD: α , β y γ donde las cavidades están formadas por 6, 7 y 8 unidades de glucopiranosas, respectivamente. Estos tipos de CD se obtienen a partir de la

degradación enzimática del almidón por la acción de la glicosiltransferasa bacteriana [92, 93].

La forma es similar a los conos, donde la capa externa es hidrófila debido a los grupos hidroxílicos guiados en este sentido y la cavidad interna está estructurada por los enlaces carbonos y éteres de los residuos de glucosa que confieren una alta hidrofobicidad. Debido a esta conformación, los CD son solubles en agua y pueden unirse selectivamente a las diferentes sustancias activas. (Moléculas orgánicas, inorgánicas o biológicas) en la cavidad [94, 95].

Se han desarrollado formulaciones cosméticas basada en CD para el rejuvenecimiento de la piel y para aumentar la solubilidad y la actividad biológica de algunos compuestos. La formulación cosmética para el rejuvenecimiento de la piel basada en CD fue desarrollada por Gnain en 2008 [96]. La formulación puede albergar ácido ascórbico (vitamina C), que posee un activo antioxidante que protege la piel de los rayos ultravioleta.

En la formulación para aumentar la solubilidad y la actividad biológica se ha empleado retinol, ubiquinona y un agente que contiene nitrógeno (biotina o carnitina). Esta formulación es capaz de proteger la piel contra factores ambientales (extrínsecos), como la luz ultravioleta, el ozono, el humo del cigarrillo y otros, mejorando los daños y el envejecimiento de la piel. Otra ventaja es la reducción de líneas finas y arrugas, además de mejorar la elasticidad de la piel [16, 97].

Las micelas son “partículas” dispersas en agua, con un tamaño que varía de 10 a 100 nm y compuestas por fosfolípidos o preparadas a partir de polímeros sintéticos anfífilos. La parte hidrófila generalmente está compuesta por unidades de óxido de polietileno y su parte hidrófoba está compuesta por aminoácidos [98].

La forma esférica es el tipo de micela más utilizado. Sin embargo, son posibles varias morfologías dependiendo de las características del copolímero, por lo que puede ocurrir una transición entre micelas y vesículas [99, 100].

La estructura micelar permite la incorporación de sustancias de baja solubilidad en su núcleo hidrófobo, mejorando así su estabilidad y biodis-

ponibilidad. Además, su capa externa tiene un papel importante en el comportamiento in vivo debido a su estabilización estérica y su capacidad para interactuar con las células. Las micelas poliméricas (son micelas formadas por surfactantes poliméricos), también facilitan el transporte de fármacos a través de la endocitosis [101].

Además, debido al pequeño tamaño, las micelas mejoran la penetración de las sustancias en las capas más profundas de la piel en los sistemas tópicos. Por tanto, se han introducido diferentes usos de las micelas en la aplicación cosmética. Algunas empresas reconocidas en el campo cosmético, como Garnier, L’Oreal, Avène, La Roche-Posay, entre otros han empleado esta tecnología en sus productos. Este producto, conocido como agua micelar, es empleado para eliminar el maquillaje y las impurezas de la piel [16].

5.1.2. *Nanocapsulas*

Las nanocápsulas son sistemas que pueden caracterizarse como nanovesículas porque están compuestas por una matriz polimérica, que forma su capa, y un núcleo aceitoso conectado con tensioactivos, que pueden ser más hidrófilos o más lipófilos. Las sustancias activas a incorporar en este sistema pueden ser sólidas o líquidas [102, 103, 104].

Los polímeros utilizados para la síntesis de nanocápsulas pueden ser de diversos orígenes, como natural, sintético o semisintético. Los más utilizados son el ácido poliláctico, ácido poliglicólico, PLGA (poli (ácido láctico-co-glicólico)), derivados de celulosa como hidroxipropilmetilcelulosa, quitosano, etc. [105, 106].

El tamaño obtenido durante la síntesis está directamente relacionado con el proceso y con los materiales utilizados, como el tipo de polímero, la cantidad de tensioactivo y el grado de hidro / lipofilidad del mismo. Teniendo en cuenta el proceso, la interferencia debe atribuirse a la velocidad de agitación, el tipo de disolvente utilizado para solubilizar el polímero, etc [107, 108]. Las nanocápsulas son una especie de nanopartículas que se han aplicado en formulaciones cosméticas y dermocosméticas para

actuar como reservorio de liberación prolongada de principios activos, protegerlos de procesos oxidativos, reducir olores desagradables, entre otros [103].

Se han desarrollado nanocápsulas como sistema de portador de vitamina A en formulación emulsionada con fines antienvjecimiento [109]. Estas nanocápsulas actuaron como un sistema reservorio liberando vitamina A con acción prolongada. También se desarrollaron una nanocápsula de γ -ácido poliglútamico / quitosanos que contenía esencia de jazmín [16]. Estas nanocapsulas mostraron una liberación sostenida de la esencia a temperatura ambiente.

5.1.3. *Nanoesferas*

Las nanoesferas son nanopartículas que, que tienen un tamaño inferior a 1 μm (1000 nm), son sistemas matriciales que están formados por una matriz polimérica, que puede contener un polímero o una mezcla del mismo para obtener diferentes propiedades, donde se incorpora o adsorbe la sustancia activa. Por tanto, no se emplea ningún componente oleoso en su composición [102, 110, 111].

Este tipo de nanopartículas se puede utilizar en la industria cosmética con el propósito de liberación prolongada de sustancias activas que brindan beneficios a la piel, como las vitaminas, o para prolongar la liberación de fragancias [112].

5.1.4. *Nanopartículas de lípidos sólidos*

Las nanopartículas lipídicas sólidas (NSL) son sistemas formados a partir de lípidos sólidos [103, 110], que presentan diámetros menores a 1 μm (1000 nm). Entre sus principales características se encuentran la estabilidad física, la protección de sustancias inestables, el control de la liberación de la sustancia activa y la capacidad de formación de película en la piel [88, 103, 113, 114]. Por tanto, los SLNP son una alternativa importante para mejorar la eficacia de los productos cosméticos.

Estos tipos de nanopartículas se utilizan para la incorporación de sustancias lipofílicas, incluso cuando se requiere un vehículo a base de agua. Esta aplicación también puede ser útil cuando el objetivo es incorporar filtros solares y químicos

lábilés, aquellos que se disuelven por medios químicos o físicos al contacto con la piel, protegiéndolas de la degradación y favoreciendo la liberación controlada [88, 103, 110, 113, 115]. En comparación con sistemas como micelas y liposomas, los LNS presentan desventajas que pueden afectar la estabilidad del sistema, como la dificultad para mantener la encapsulación activa e inestabilidad física durante la administración en el período de almacenamiento [103].

5.1.5. *Liposomas*

Los liposomas y las nanocápsulas son sistemas de depósito. Son vesículas esféricas que pueden estar compuestas por una membrana fosfolipídica que tiene en su interior un núcleo acuoso [88, 103, 110, 114]. Los liposomas pueden contener una o más membranas; de esta manera se clasifican en unilaminares o multilaminares, con un diámetro de partícula de 20 a 3500 nm. Los liposomas con una sola membrana y con un pequeño compartimento acuoso se denominan pequeños liposomas unilaminares, y su diámetro varía entre 20 y 50 nm. Sin embargo, cuando la cavidad acuosa es grande, las vesículas obtenidas varían de 200 a 1000 nm. Los liposomas multilaminares son aquellos en los que existen varias bicapas lipídicas y espacios acuosos entre ellos; este hecho provoca el aumento de diámetro y la estructura varía de 400 a 3500 nm [116]. Se agrega colesterol a la preparación para aumentar la estabilidad y mantener la sustancia atrapada dentro de las vesículas durante un período de tiempo más prolongado.

Las aplicaciones de los liposomas se han expandido a campos variados, especialmente a los cosméticos, donde ha sido reconocido como uno de los sistemas de administración de cosméticos más utilizados. Su composición estructural permite el atrapamiento de los fármacos hidrófilos y lipófilos en el núcleo acuoso y la porción no polar de la membrana bicapa, respectivamente [90].

Los liposomas cosméticos se pueden dividir en diferentes formas dependiendo de la composición y el propósito de uso.

- Transferosomas.

Son liposomas ultra deformables, biocompatibles, biodegradables y altamente eficientes. Su tamaño varía de 200 a 300 nm. Penetran a través de la piel por vías transcelulares e intracelulares. Compuestas por fosfolípidos, colesterol y un activador de bordes, es decir, tensioactivos como el colato de sodio [117].

■ Niosomas

También conocidas como vesículas de tensioactivos no iónicos. Están compuestas de colesterol y tensioactivos no iónicos, como Spans, Tweens y Brij generalmente pertenecen a la clase de alquil o dialquil poliglicerol éter. Según la estructura, pueden clasificarse además, como pequeñas vesículas unilamelares (25-500 nm de diámetro), vesículas multilaminares (0,5-10 μm de diámetro) o grandes vesículas unilamelares (0,1-1 μm de diámetro) [118].

■ Novasomas

Es una técnica de encapsulación innovadora con varias ventajas como alta capacidad de carga, estética mejorada, estabilidad, rendimiento, rentable, irritación reducida y fácil de escalar. Estos son liposomas modificados o una variación de niosomas. Son vesículas no fosfolipídicas. Su tamaño puede oscilar entre 0,1 y 1 μm [119].

■ Marinosomas

Elaborado con extractos de lípidos marinos. Estos extractos son ricos en ácidos grasos poliinsaturados omega-3 como el ácido eicosapentaenóico y el ácido docosahexaenóico. Las enzimas presentes en la epidermis metabolizan estos lípidos y los convierten en los metabolitos que tienen propiedades antiinflamatorias y antiproliferativas. Por tanto, los marinosomas se pueden utilizar para tratar problemas inflamatorios de la piel [117].

■ Fitosomas

Usados para mejorar la biodisponibilidad de los extractos herbales o de los componentes activos herbales aislados, se introdujo un

nuevo concepto de fitosomas. Es una mezcla compleja de fosfolípidos generalmente lecitina y extractos activos naturales como flavonoides, glucósidos y terpenoides [120].

■ Nanosomas

Son pequeños liposomas con vesículas de rango nanométrico. Elaborado con fosfatidilcolina pura [121].

■ Glicerosomas

Estos son una forma modificada de liposomas que contienen glicerol además de fosfolípidos. Tienen un alto potencial para ser utilizados en cosméticos para proporcionar compuestos activos debido a su alto rendimiento, propiedades curativas y de embellecimiento [122].

■ Esfingosomas

Sistemas vesiculares lipídicos que consisten en un núcleo acuoso encerrado por una bicapa lipídica membrana. Los esfingolípidos sintéticos o naturales constituyen la bicapa lipídica [123].

6. Perspectivas a futuro

El consumo de mercado de productos cosméticos se está acelerando. OrbisResearch.com informó que el mercado mundial de productos cosméticos se valoró en \$ 532,43 mil millones en 2017, y se espera que crezca a \$ 805,61 mil millones para 2023 [124].

Hoy en día, existe una demanda significativa de productos innovadores en el mercado cosmético mundial. Los clientes buscan y prefieren los nuevos productos de alta eficacia y con la tendencia a lo natural, por ello los fabricantes de cosméticos y los productores de materias primas están cada vez más abiertos al uso de ingredientes naturales en los cosméticos y al uso de ingredientes y métodos de preparación respetuosos con el medio ambiente.

Se podrían obtener innumerables ventajas empleando nanosistemas en cosmética, incluida la preferencia de los consumidores potenciales, lo que sugiere que la nanotecnología es sinónimo de productos de buena calidad.

Esto puede verse como una oportunidad para nuevos desarrollos en las ciencias de sistemas dispersos y para llegar a otros mercados en un período en el que los consumidores con conciencia social son una nueva fuerza impulsora detrás del mercado de los cosméticos.

7. Referencias

- [1] R. Ribeiro, S. Barreto, E. Ostrosky, P. Da Rocha-Filho, L. Veríssimo, and M. Ferrari, "Production and characterization of cosmetic nanoemulsions containing *Opuntia ficusindica* (L.) mill extract as moisturizing agent," *Molecules*, vol. 20, no. 2, pp. 2492–2509, 2015.
- [2] F. Silva, E. Ricci-Junior, and C. Mansur, "Nanoemulsions containing octyl methoxycinnamate and solid particles of TiO_2 : preparation, characterization and in vitro evaluation of the solar protection factor," *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 39, pp. 1378–1388, 2013.
- [3] S. Samson, M. Basri, H. Masoumi, E. Malek, and R. Karjiban, "An artificial neural network based analysis of factors controlling particle size in a virgin coconut oil-based nanoemulsion system containing copper peptide," *PLoS ONE*, vol. 11, no. 7, pp. 1–15, 2016.
- [4] O. Sonnevile-Aubrun, M. Yukuyama, and A. Pizzino, *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Application of Nanoemulsions in Cosmetics, pp. 345–375.
- [5] M. El-Aasser, C. Lack, Y. Choi, T. Min, J. Vanderhoff, and F. Fowkes, "Interfacial aspects of miniemulsions and miniemulsion polymers," *Colloids and Surfaces*, vol. 12, pp. 79–97, 1984.
- [6] D. Qi, Z. Cao, and U. Ziener, "Recent advances in the preparation of hybrid nanoparticles in miniemulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 211, pp. 47–62, 2014.
- [7] S. Manickam, K. Sivakumar, and C. Heng Pang, "Investigations on the Generation of Oil-in-Water (O/W) Nanoemulsions through the Combination of Ultrasound and Microchannel," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 69, p. 105258, 2020.
- [8] T. Forster, *Surfactant Science Series*. New York: Marcel Dekker, 1997, vol. 68, ch. Surfactants in cosmetics.
- [9] A. Forgiarini, J. Esquena, C. González, and C. Solans, "Studies of the relation between phase behavior and emulsification methods with nanoemulsion formation," in *Trends in Colloid and Interface Science XIV. Progress in Colloid and Polymer Science*, V. Buckin, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000, vol. 115.
- [10] C. Solans and I. Solé, "Nano-emulsions: Formation by low-energy methods," *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 17, no. 5, pp. 246–254, 2012.
- [11] N. Anton, S. Akram, and T. Vandamme, *Nanoemulsions: Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Transitional Nanoemulsification Methods, pp. 77–110.
- [12] P. Taylor and R. H. Ottewill, "The formation and ageing rates of oil-in-water miniemulsions," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 88, no. 2–3, pp. 303–316, 1994.
- [13] P. Taylor, "Ostwald ripening in emulsions," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 75, no. 2, pp. 107–163, 1998.
- [14] C. Solans and M. J. García-Celma, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2017, ch. Microemulsiones y nano emulsiones para aplicaciones cosméticas, pp. 507–518.
- [15] T. Tadros, *Applied Surfactants: Principles and Applications*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2005.
- [16] B. Chiari-Andréo, M. Almeida-Cincotto, J. Oshiro, C. Yamada-Taniguchi, L. Chiavacci, and V. L. Borges-Isaac, *Nanoparticles in Pharmacotherapy*, 1st ed. Elsevier, 2019, ch. Nanoparticles for cosmetic use and its application, pp. 113–146.
- [17] K. Lintner, C. Mas-Chamberlin, P. Mondon, O. Peschard, and L. Lamy, "Cosmeceuticals and active ingredients," *Clinics in Dermatology*, vol. 27, no. 5, pp. 461–468, 2009.
- [18] Y. Maphosa and V. A. Jideani, *Science and Technology Behind Nanoemulsions*, 1st ed. London: IntechOpen, 2018, ch. Factors affecting the stability of emulsions stabilised by biopolymers, pp. 65–81.
- [19] L. Lopes, "Overcoming the Cutaneous Barrier with Microemulsions," *Pharmaceutics*, vol. 6, no. 1, pp. 52–77, 2014.
- [20] A. Faria-Silva, A. Costa, A. Ascenso, H. Ribeiro, J. Marto, L. Gonçalves, and S. Simões, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Nanoemulsions for cosmetic products, pp. 59–77.
- [21] J. Schulman, W. Stoeckenius, and L. Prince, "Mechanism of Formation and Structure of Micro Emulsions by Electron Microscopy," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 63, no. 10, pp. 1677–1680, 1959.
- [22] N. Anton and T. Vandamme, "Nano-emulsions and micro-emulsions: clarifications of the critical differences," *Pharmaceutical Research*, vol. 28, pp. 978–985, 2011.
- [23] C. Nastiti, T. Ponto, E. Abd, J. Grice, H. Benson, and M. Roberts, "Topical Nano and Microemulsions for Skin Delivery," *Pharmaceutics*, vol. 9, no. 4, pp. 1–25, 2017.

- [24] G. Broze, *Surfactant Science Series*, 1st ed. New York: Marcel Dekker, 1999, ch. Handbook of Detergents - Part A: Properties, pp. 253–302.
- [25] K. Bouchemal, S. Briançon, E. Perrier, and H. Fessi, “Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: solvent, oil and surfactant optimization,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 280, no. 1–2, pp. 241–251, 2004.
- [26] S. Jafari, P. Paximada, I. Mandala, E. Assadpour, and M. Mehrnia, *Nanoencapsulation Technologies for the Food and Nutraceutical Industries*, 1st ed. Academic Press, 2017, ch. Encapsulation by nanoemulsiones, pp. 36–73.
- [27] F. Villalobos-Castillejos, G. Granillo-Guerrero, D. Leyva-Daniel, L. Alamilla-Beltrán, G. Gutiérrez-López, A. Monroy-Villagrana, and S. Mahdi Jafari, *Nanoemulsion. Formulation, Applications, and Characterization*, 1st ed. Academic Press, 2018, ch. Fabrication of Nanoemulsions by Microfluidization, pp. 207–232.
- [28] S. Gharibzadeh and S. Jafari, *Nanoemulsions Formulation, Applications, and Characterization*. Academic Press, 2018, ch. Fabrication of Nanoemulsions by Ultrasonication, pp. 233–285.
- [29] L. Lee and I. Norton, “Comparing droplet breakup for a high-pressure valve homogenizer and a microfluidizer for the potential production of food-grade nanoemulsiones,” *Journal of Food Engineering*, vol. 114, no. 2, pp. 158–163, 2013.
- [30] D. Oh, P. Balakrishnan, Y. Oh, D. Kim, C. Yong, and H. Choi, “Effect of process parameters on nanoemulsion droplet size and distribution in SPG membrane emulsification,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 404, no. 1–2, pp. 191–197, 2011.
- [31] A. Ribier, J. Simonnet, and J. Michelet, “Dermatologic or Cosmetic Composition Made Up by an Oil-in-Water Emulsion Based on Oily Globules Coated With a Lamellar Liquid Crystal Coating,” French, Paris European Patent EP 0 641 557 B1, 1995.
- [32] A. Ribier, J. Simonnet, and S. Legret, “Transparent Nanoemulsion Less Than 100 nm Based on Fluid Non-Ionic Amphiphilic Lipids and Use in Cosmetics or in Dermopharmaceutics,” U.S. US Patent 5,753,241, 1998.
- [33] R. Knapik, M. Rocha dos Santos, C. Praes, and L. Lima de Oliveira, “Characterizing nanoemulsions prepared by high pressure homogenization under various emulsifying conditions,” *Cosmetics Toiletries*, vol. 125, pp. 72–78, 2010.
- [34] T. Okamoto, S. Tomomasa, and H. Nakajima, “Preparation and Thermal Properties of Fatty Alcohol/Surfactant/Oil/Water Nanoemulsions and Their Cosmetic Applications,” *Journal of Oleo Science*, vol. 65, no. 1, pp. 27–36, 2016.
- [35] A. Gupta, H. Eral, T. Hatton, and P. Doyle, “Nanoemulsions: formation, properties and applications,” *Soft Matter*, vol. 12, no. 11, pp. 2826–2841, 2016.
- [36] J. Floury, J. Bellettre, J. Legrand, and A. Desrumaux, “Analysis of a new type of high pressure homogeniser. A study of the flow pattern,” *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 4, pp. 843–853, 2004.
- [37] T. Mason, S. Graves, J. Wilking, and M. Lin, “Extreme emulsification: formation and structure of nanoemulsiones,” *Condensed Matter Physics*, vol. 9, no. 1, pp. 193–199, 2006.
- [38] K. Meleson, S. Graves, and T. Mason, “Formation of Concentrated Nanoemulsions by Extreme Shear,” *Soft Materials*, vol. 2, no. 2–3, pp. 109–123, 2004.
- [39] T. Delmas, H. Piroux, A. C. Couffin, I. Texier, F. Vinet, P. Poulin, M. E. Cates, and J. Bibette, “How To Prepare and Stabilize Very Small Nanoemulsions,” *Langmuir*, vol. 27, no. 5, pp. 1683–1692, 2011.
- [40] J. Edelson and R. Nicolosi, “Botulinum Nanoemulsions,” U.S. U.S. Patent US 2014/0 099 342 A1, 2016.
- [41] J. Edelson and T. Kotyla, “Peptide nanoparticles and uses therefor,” U.S. U.S. Patent US 9,486,409 B2, 2016.
- [42] S. Barreto, M. Maia, A. Benicá, H. de Assis, V. Leite-Silva, P. da Rocha-Filho, and M. Ferrari, “Evaluation of in vitro and in vivo safety of the by-product of Agave sisalana as a new cosmetic raw material: Development and clinical evaluation of a nanoemulsion to improve skin moisturizing,” *Industrial Crops and Products*, vol. 108, pp. 470–479, 2017.
- [43] E. El-Leithy, A. Makky, A. Khatib, and D. Hussein, “Optimization of nutraceutical coenzyme Q10 nanoemulsion with improved skin permeability and anti-wrinkle efficiency,” *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 44, no. 2, pp. 316–328, 2017.
- [44] M. Mansur, C. Campos, A. Vermelho, J. Nobrega, L. da Cunha Boldrini, L. Balottin, and E. dos Santos, “Photoprotective nanoemulsions containing microbial carotenoids and buriti oil: Efficacy and safety study,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13, no. 8, pp. 6741–6752, 2020.
- [45] F. Nigro, C. Cerqueira, A. Rossi, V. Cardoso, A. Vermelho, E. Ricci-Júnior, and C. Mansur, “Development, characterization and in vitro toxicity evaluation of nanoemulsion-loaded hydrogel based on copaiba oil and coenzyme Q10,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 585, p. 124132, 2019.
- [46] K. Tou, K. Rehman, W. Ishak, and M. Zulfakar, “Influence of omega fatty acids on skin permeation of a coenzyme Q10 nanoemulsion cream formulation: characterization, in silico and ex vivo determination,” *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 45, pp. 1451–1458, 2019.
- [47] B. Brownlow, V. Nagaraj, A. Nayel, M. Joshi, and T. Elbayoumi, “Development and In Vitro Evaluation of Vitamin E-Enriched Nanoemulsion Vehicles Loaded with Genistein for Chemoprevention

- Against UVB-Induced Skin,” *Damage Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 104, pp. 3510–3523, 2015.
- [48] I. Solè, A. Maestro, C. González, C. Solans, and J. Gutiérrez, “Optimization of nano-emulsion preparation by low-energy methods in an ionic surfactant system,” *Langmuir*, vol. 22, no. 20, pp. 8326–8332, 2006.
- [49] Y. Yang, C. Marshall-Breton, M. Leser, A. Sher, and D. McClements, “Fabrication of ultrafine edible emulsions: Comparison of high-energy and low-energy homogenization methods,” *Food Hydrocolloids*, vol. 29, no. 2, pp. 398–406, 2012.
- [50] N. Anton and T. Vandamme, “The universality of low-energy nano-emulsification,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 377, no. 1–2, pp. 142–147, 2009.
- [51] J. López-Montilla, P. Herrera-Morales, S. Pandey, and D. Shah, “Spontaneous Emulsification: Mechanisms, Physicochemical Aspects, Modeling, and Applications,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 23, no. 1–3, pp. 219–268, 2002.
- [52] C. Miller, “Spontaneous Emulsification Produced by Diffusion – A Review,” *Colloids and Surfaces*, vol. 29, no. 1, pp. 89–102, 1988.
- [53] I. Solè, A. Maestro, C. González, C. Solans, and J. Gutiérrez, “Influence of the phase behavior on the properties of ionic nanoemulsions prepared by the phase inversion composition method,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 327, no. 2, pp. 433–439, 2008.
- [54] R. Pasquali, C. Bregni, and R. Serrao, “Características e identificación de los cristales líquidos liotrópicos,” *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, vol. 37, no. 2, pp. 38–53, 2006.
- [55] I. Solè, C. Solans, A. Maestro, C. González, and J. Gutiérrez, “Study of nano-emulsion formation by dilution of microemulsions,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 376, no. 1, pp. 133–139, 2012.
- [56] J. Pereira, A. García, S. Ceballos, J. López-Montilla, A. Muñoz, and V. Coronel, “Una metodología alternativa para evaluar la producción espontánea de emulsiones,” *Faraute*, vol. 7, no. 2, pp. 38–42, 2012.
- [57] D. Morales, J. Gutiérrez, M. García-Celma, and Y. Solans, “A Study of the Relation between Bicontinuous Microemulsions and Oil/Water Nanoemulsion Formation,” *Langmuir*, vol. 19, no. 18, pp. 7196–7200, 2003.
- [58] A. Forgiarini, J. Esquena, C. González, and C. Solans, “Formation of Nano-emulsions by Low-Energy Emulsification Methods at Constant Temperature,” *Langmuir*, vol. 17, no. 7, pp. 2076–2083, 2001.
- [59] L. Scriven, “Equilibrium bicontinuous structure,” *Nature*, vol. 263, pp. 123–125, 1976.
- [60] K. Shinoda and H. Saito, “The effect of temperature on the phase equilibria and the types of dispersions of the ternary system composed of water, cyclohexane, and nonionic surfactant,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 26, no. 1, pp. 70–74, 1968.
- [61] N. Anton, J. Benoit, and P. Saulnier, “Design and production of nanoparticles formulated from nano-emulsion templates—A review,” *Journal of Controlled Release*, vol. 128, no. 3, pp. 185–199, 2008.
- [62] T. Forster, W. von Rybinski, and A. Wadle, “Influence of microemulsion phases on the preparation of fine-disperse emulsions,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 58, no. 2–3, pp. 119–149, 1995.
- [63] J. L. Salager, A. Forgiarini, L. Márquez, A. Peña, A. Pizzino, M. Rodríguez, and M. Rondón-González, “Using emulsion inversion in industrial processes,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 108–109, pp. 259–272, 2004.
- [64] P. Izquierdo, J. Esquena, T. Tadros, J. Dederen, J. Feng, M. García-Delma, N. Azemar, and C. Solans, “Phase behavior and nano-emulsion formation by the phase inversion temperature method,” *Langmuir*, vol. 20, no. 16, pp. 6594–6598, 2004.
- [65] C. Solans, P. Izquierdo, J. Nolla, N. Azemar, and M. J. García-Celma, “Nanoemulsions,” *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 10, no. 3–4, pp. 102–110, 2005.
- [66] Z. Yang, W. Wang, G. Wang, and X. Tai, “Optimization of low-energy Pickering nanoemulsion stabilized with montmorillonite and nonionic surfactants,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 585, p. 124098, 2019.
- [67] N. Zadymova, M. Tao, and M. Poteshnova, “Tween 85 Oil-in-Water Nanoemulsions with Incorporated Chlorhexidine Base,” *Colloid Journal*, vol. 80, pp. 158–166, 2018.
- [68] Q. Meng, P. Long, J. Zhou, C. Ho, X. Zou, B. Chen, and L. Zhang, “Improved absorption of β -carotene by encapsulation in an oil-in-water nanoemulsion containing tea polyphenols in the aqueous phase,” *Food Research International*, vol. 116, pp. 731–736, 2019.
- [69] Y. J. Jo, H. Karbstein, and U. van der Schaaf, “Collagen peptide-loaded W1/O single emulsions and W1/O/W2 double emulsions: Influence of collagen peptide and salt concentration, dispersed phase fraction and type of hydrophilic emulsifier on droplet stability and encapsulation efficiency,” *Food & Function*, vol. 10, no. 6, pp. 3312–3323, 2019.
- [70] R. Harwansh, P. Mukherjee, A. Kar, S. Bahadur, N. Al-Dhabi, and V. Duraipandian, “Enhancement of photoprotection potential of catechin loaded nanoemulsion gel against UVA induced oxidative stress,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 160, pp. 318–329, 2016.
- [71] W. C. Lu, D. W. Huang, C. C. Wang, C. H. Yeh, J. C. Tsai, Y. T. Huang, and P. H. Li, “Preparation, characterization, and antimicrobial activity of nanoemulsions incorporating citral essential oil,” *Journal of Food and*

- Drug Analysis*, vol. 26, no. 1, pp. 82–89, 2018.
- [72] A. Sahu, J. Mishra, and A. Mishra, “Introducing Tween-Curcumin Niosomes: Preparation, Characterization and Microenvironment study,” *Soft Matter*, vol. 16, no. 7, pp. 1779–1791, 2020.
- [73] A. Kakuste, M. Borse, and G. Sonawane, “Polyacrylic acid and polyacrylamide as cloud point modifier for Brij-30 in alcoholic aqueous solution,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 334–338, 2017.
- [74] R. Goldstein, “On the theory of lower critical solution points in hydrogen-bonded mixtures,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 80, no. 10, pp. 5340–5341, 1984.
- [75] S. Wartewig, I. Alig, W. D. Hergeth, J. Lange, I. Lochmann, and T. Scherzed, “Spectroscopic investigations on aqueous solution of poly(oxyethylene)-poly(oxypropylene)-poly(oxyethylene) triblockcopolymers,” *Journal of Molecular Structure*, vol. 219, pp. 365–370, 1990.
- [76] G. Karlstroem, “A new model for upper and lower critical solution temperatures in poly (ethylene oxide) solutions,” *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 89, pp. 4962–4964, 1985.
- [77] A. Machado, D. Lundberg, A. Ribeiro, F. Veiga, B. Lindman, M. Miguel, and U. Olsson, “Preparation of Calcium Alginate Nanoparticles Using Water-in-Oil (W/O) Nanoemulsions,” *Langmuir*, vol. 28, no. 9, pp. 4131–4141, 2012.
- [78] N. Sadurní, C. Solans, N. Azemar, and M. García-Celma, “Studies on the formation of O/W nanoemulsions, by low-energy emulsification methods, suitable for pharmaceutical applications,” *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 26, no. 5, pp. 438–445, 2005.
- [79] R. Su, L. Yang, Y. Wang, S. Yu, Y. Guo, J. Deng, and X. Jin, “Formulation, development, and optimization of a novel octyldodecanol-based nanoemulsion for transdermal delivery of ceramide IIIB,” *International Journal of Nanomedicine*, vol. 12, pp. 5203–5221, 2017.
- [80] P. Rocha-Filho, M. Ferrari, M. Maruno, O. Souza, and V. Gumiero, “In Vitro and In Vivo Evaluation of Nanoemulsion Containing Vegetable Extracts,” *Cosmetics*, vol. 4, no. 32, 2017.
- [81] M. Dario, M. Santos, A. Viana, E. Arêas, N. Bou-Chacra, M. Oliveira, and M. Velasco, “A high loaded cationic nanoemulsion for quercetin delivery obtained by sub-PIT method,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 489, pp. 256–264, 2016.
- [82] T. Pereira, C. Guerreiro, M. Maruno, M. Ferrari, and P. Rocha-Filho, “Exotic Vegetable Oils for Cosmetic O/W Nanoemulsions: In Vivo Evaluation,” *Molecules*, vol. 21, no. 3, p. 248, 2016.
- [83] J. Salager, R. Antón, J. Bullón, A. Forgiarini, and R. Marquez, “How to Use the Normalized Hydrophilic-Lipophilic Deviation (HLDN) Concept for the Formulation of Equilibrated and Emulsified Surfactant-Oil-Water Systems for Cosmetics and Pharmaceutical Products,” *Cosmetics*, vol. 7, no. 3, p. 57, 2020.
- [84] V. Perez, M. Sanchez, V. Coronel, J. Pereira, and R. Alvarez, “Uso de microemulsiones en la limpieza de suelos contaminados con crudo,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 19, no. 2, pp. 61–68, 2012.
- [85] T. Hirao, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Elsevier, 2017, ch. Structure and Function of Skin From a Cosmetic Aspect, pp. 673–683.
- [86] A. Machado, P. Lopes, C. Raffier, I. Haridass, M. Roberts, J. Grice, and V. Leite-Silva, *Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications*, 1st ed. Elsevier, 2017, ch. Skin Penetration, pp. 741–755.
- [87] D. Morrow, P. McCarron, A. Woolfson, and R. Donnelly, “Innovative strategies for enhancing topical and transdermal drug delivery,” *The Open Drug Delivery Journal*, vol. 1, pp. 36–59, 2007.
- [88] A. Mihranyan, N. Ferraz, and M. Stromme, “Current status and future prospects of nanotechnology in cosmetics,” *Progress in Materials Science*, vol. 57, no. 5, pp. 875–910, 2012.
- [89] S. Dutta, S. Sivakamasundari, J. Moses, and A. Chin-naswamy, *Nanoengineering in the Beverage Industry*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Nanoencapsulation of Green Tea Polyphenols, pp. 229–261.
- [90] S. Dhawan, P. Sharma, and S. Nanda, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Cosmetic nanoformulations and their intended use, pp. 141–169.
- [91] S. Ghosh, A. Badruddoza, M. Uddin, and K. Hidajat, “Adsorption of chiral aromatic amino acids onto carboxymethyl- β -cyclodextrin bonded $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ core-shell nanoparticles,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 354, no. 2, pp. 483–492, 2011.
- [92] L. Barreto and M. Cunha, “Cyclodextrin: important pharmaceutical functional excipient,” *Latin American Journal of Pharmacy*, vol. 27, no. 4, pp. 629–636, 2008.
- [93] A. Rasheed, C. Kumar, and V. Sravanthi, “Cyclodextrins as drug carrier molecule: a review,” *Scientia Pharmaceutica*, vol. 76, no. 4, pp. 567–598, 2008.
- [94] D. Alvarez-Dorta, E. León, A. Kennedy, A. Martín, I. Pérez-Martín, and E. Suárez, “Easy Access to Modified Cyclodextrins by an Intramolecular Radical Approach,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 54, pp. 3674–3678, 2015.
- [95] Y. Guo, S. Guo, J. Li, E. Wang, and S. Dong, “Cyclodextrin-graphene hybrid nanosheets as enhanced sensing platform for ultrasensitive determination of carbendazim,” *Talanta*, vol. 84, no. 1, pp. 60–64, 2011.

- [96] J. Gnaim, "Cyclodextrin containing polymers and uses thereof," U.S. Patent US20 080 275 139A1, 2008.
- [97] H. D. Max, T. D. Raschke, and R. D. Schimpf, "Skin care compositions with retinoids, ubiquinones, and biotin or carnitine," German European Patent EP1 449 514A1, 2004.
- [98] M. Adams, A. Lavasanifar, and G. Kwon, "Amphiphilic block copolymers for drug delivery," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 92, no. 7, pp. 1343–1355, 2003.
- [99] A. Choucair and A. Eisenberg, "Control of amphiphilic block copolymer morphologies using solution conditions," *The European Physical Journal E*, vol. 10, pp. 37–44, 2003.
- [100] L. Zhang, K. Yu, and A. Eisenberg, "Ion-Induced Morphological Changes in "Crew-Cut" Aggregates of Amphiphilic Block Copolymers," *Science*, vol. 272, no. 5269, pp. 1777–1779, 1996.
- [101] K. Yoncheva, P. Calleja, M. Agüeros, P. Petrov, I. Miladinova, C. Tsvetanov, and J. Irache, "Stabilized micelles as delivery vehicles for paclitaxel," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 436, no. 1-2, pp. 258–264, 2012.
- [102] A. Bizerra and V. Silva, "Sistemas de Liberação Controlada: Mecanismos e aplicações," *Revista Saúde e Meio Ambiente-RESMA*, vol. 3, no. 2, pp. 1–12, 2016.
- [103] R. Daudt, J. Emanuelli, I. Kulkap-Guerreiro, A. Pohlmann, and S. Guterres, "A nanotecnologia como estratégia para o desenvolvimento de cosméticos," *Ciência e Cultura*, vol. 65, no. 3, p. 2831, 2013.
- [104] J. Devissaguet and H. Fessi, "Process for the preparation of dispersible colloidal system of a substance in the form of nanocapsules," France Patent Application Patent US5 049 322A, 1991.
- [105] O. Pillai and R. Panchagnula, "Polymers in drug delivery," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 5, no. 4, pp. 447–451, 2001.
- [106] S. Schaffazick, S. Guterres, L. Freitas, and A. Pohlmann, "Caracterización y estabilidad físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administración de fármacos," *Química Nova*, vol. 26, no. 5, pp. 726–737, 2003.
- [107] D. Moinard-Chécot, Y. Chevalier, S. Briançon, L. Beney, and H. Fessi, "Mechanism of nanocapsules formation by the emulsion-diffusion process," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 317, no. 2, pp. 458–468, 2008.
- [108] A. Esmaeili, B. Saremnia, A. Koohian, and S. Rezazadeh, "Mechanism of nanocapsules of Matricaria recutita L. extract formation by the emulsion diffusion process," *Superlattices and Microstructures*, vol. 50, no. 4, pp. 340–349, 2011.
- [109] I. Kaur and I. Agrawal, "Nanotechnology: A New Paradigm in Cosmeceuticals," *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, vol. 1, no. 2, pp. 171–182, 2007.
- [110] P. Dos Santos, P. Miyashiro, and V. Da Silva, "A Nanotecnologia Em Formulação Cosmética," Master's thesis, Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas, 2015.
- [111] P. Morganti, "Use and potential of nanotechnology in cosmetic dermatology," *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, vol. 3, pp. 5–13, 2010.
- [112] T. Tree-Udom, S. Wanichwecharungruang, J. Seemork, and S. Arayachukeat, "Fragrant chitosan nanospheres: controlled release systems with physical and chemical barriers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 4, pp. 1602–1609, 2011.
- [113] A. Garud, S. Deepti, and N. Garud, "Solid lipid nanoparticles (SLN): method, characterization and applications," *International Current Pharmaceutical Journal*, vol. 1, no. 11, pp. 384–393, 2012.
- [114] I. Sarathchandiran, "A review on nanotechnology in solid lipid nanoparticles," *International Journal of Pharmaceutical Development & Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 45–61, 2012.
- [115] X. Wu and R. H. Guy, "Applications of nanoparticles in topical drug delivery and in cosmetics," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 371–384, 2009.
- [116] M. R. Mozafari, "Liposomes: an overview of manufacturing techniques," *Cellular & Molecular Biology Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 711–719, 2005.
- [117] T. Reva, A. Vaseem, S. Satyaprakash, and J. Md.Khalid, "Liposomes: the novel approach in cosmaceuticals," *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, vol. 4, no. 6, pp. 1616–1640, 2015.
- [118] S. Kurapati, "The current role of nanomaterials in cosmetics," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, vol. 8, no. 5, pp. 906–914, 2016.
- [119] A. Singh, R. Malviya, and P. Sharma, "Novasome—a breakthrough in pharmaceutical technology a review article," *Advances in Biological Research*, vol. 5, no. 4, pp. 184–189, 2011.
- [120] N. Karimi, B. Ghanbarzadeh, H. Hamishehkar, F. Keyvani, A. Pezeshki, and M. Gholian, "Phytosome and liposome: the beneficial encapsulation systems in drug delivery and food application," *Journal Applied Food Biotechnology*, vol. 2, no. 3, pp. 17–26, 2015.
- [121] M. Nounou, L. El-Khordagui, N. Khalafallah, and S. Khalil, "Liposomal Formulation for Dermal and Transdermal Drug Delivery: Past, Present and Future," *Recent Patents on Drug Delivery & Formulation*, vol. 2, no. 1, pp. 9–18, 2008.
- [122] P. Ganesan and D. Choi, "Current application of phytocompound-based nanocosmeceuticals for beauty and skin therapy," *International Journal of Nanomedicine*, vol. 11, pp. 1987–2007, 2016.
- [123] K. Fathima, N. Antony, A. Paul, and S. Nair, "Sphingosome vesicular system," *International*

Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research, vol. 41, no. 1, pp. 208–213, 2016.

- [124] T. Nguyen and S. Rajendran, *Nanocosmetics Fundamentals, Applications and Toxicity*, 1st ed. Elsevier, 2020, ch. Current commercial nanocosmetic products, pp. 445–453.

Breve reseña de los autores

1. Ruth Desiree Monroy

Ruth Desiree Monroy Lic. En Química. Doctorante en el programa de Doctorado en Química Tecnológica de FACYT, Universidad de Carabobo. Investigadora del Laboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados (PHD) con 5 años de experiencia en el campo de formulación de microemulsiones, nanoemulsiones y emulsiones para el área cosmética y del cuidado personal.

2. Juan Pereira

Juan C. Pereira obtuvo un B.Sc. en química y un M.Sc. en Química de la Universidad Central de Venezuela (Venezuela), Doctor en Ciencias Aplicadas de la Universidad de los Andes (Mérida–Venezuela). Durante los últimos 23 años ha estado involucrado en la enseñanza y la investigación en la Universidad de Carabobo (Carabobo–Venezuela), donde es Director del Laboratorio de PHD. Actualmente es Profesor Titular y Consultor Industrial en Fenómenos Interfaciales con aplicaciones en la producción de petróleo, hidrocoloides alimentarios y química agrícola.

Characterization and incorporation of an extract of passion fruit seeds (*Passiflora edulis*) in a hydrogel

Emilly Scotti ^a , Ingrid Velásquez ^{*,a,b} , Luis Ojeda ^b , Franklin Pacheco ^b ,
Nirza Noguera-Machado ^b ,

^aLaboratorio de Petróleo, Hidrocarburos y Derivados. Facultad Experimental de Ciencia y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

^bInstituto de Investigaciones Biomédicas Francisco Javier Triana Alonso. Facultad Ciencias de la Salud. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

Abstract.- The potential for reusing passion fruit seeds to obtain functional ingredients may find applications in food, chemicals and the pharmaceutical industry. Studies have confirmed that the extracts of these seeds possess pharmacological properties that include their antimicrobial and antioxidant capacity. This research proposes obtaining an extract and its characterization, to be included in a hydrogel and establish its possible antibacterial activity. The extraction was carried out under total reflux with ethanol, with a yield of $(19,65 \pm 0,01) \%$. When characterized, it was found that it is soluble in alcohols, and in its infrared characteristic bands of phenolic groups, OH and radicals are observed. The extract has $(64,45 \pm 0,01) \text{ mgGAE/g}_{\text{extract of total phenols}}$, of which 43 % are flavonoids. To formulate the hydrogel, the response surface methodology was used, establishing the proportions of 3 % carboxymethyl cellulose, 20 % polyethylene glycol and 5 % citric acid. The hydrogel has a stability of more than 90 days, a yellowish color and a smell of passion fruit, easy to spread. Through a qualitative study, the gel produced was compared with a commercial one and its antibacterial activity, finding that both had a bacteriostatic effect on a common microbial strain.

Keywords: Passion fruit; seed oil; hydrogel; chemical crosslinking; polyphenols.

Caracterización e incorporación de un extracto de semillas de parchita (*Passiflora edulis*) en un hidrogel

Resumen.- El potencial de reutilización de las semillas de parchita para obtener ingredientes funcionales puede encontrar aplicaciones en alimentos, productos químicos y la industria farmacéutica. Estudios han confirmado que los extractos de estas semillas poseen propiedades farmacológicas que incluyen su capacidad antimicrobiana y antioxidante. Esta investigación plantea la obtención de un extracto y su caracterización, para ser incluido en un hidrogel y establecer su posible actividad antibacterial. La extracción se realizó a reflujo total con etanol, con un rendimiento del $(19,65 \pm 0,01) \%$. Al ser caracterizado se encontró que era soluble en alcoholes, y en su infrarrojo se observaron bandas características de grupos fenólicos, OH y radicales. El extracto posee $(64,45 \pm 0,01) \text{ mgGAE/g}_{\text{extracto de fenoles totales}}$, de los cuales el 43 % son flavonoides. Para formular el hidrogel se empleó la metodología de superficie de respuesta estableciéndose las proporciones de 3 % de carboximetil celulosa, 20 % polietilenglicol y 5 % ácido cítrico. El hidrogel posee una estabilidad de más de 90 días, un color amarillento y olor a parchita, fácil de esparcir. Mediante un estudio cualitativo se comparó el gel elaborado con uno comercial y su actividad antibacterial, encontrándose que ambos generan un efecto bacteriostático sobre una cepa microbiana común.

Palabras clave: Maracuyá; aceite de semilla; hidrogel; entrecruzamiento químico; polifenoles.

Recibido: 26 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

1. Introducción

La maracuyá o parchita (*Passiflora edulis*) es una planta trepadora del género *Passiflora*, nativa de las regiones cálidas de América del Sur. Este género es el más grande y de mayor importancia de la familia Passifloraceae, abarca aproximadamente

* Autor para correspondencia:

Correo-e: ivvelasquez@uc.edu.ve (I. Velásquez)

500 especies, entre ellas, las frutas de solo unas 20 variedades son comestibles [1]. Las plantas de parchita son estratégicas en el contexto de la biodiversidad para la alimentación y la nutrición, de la masa total de la fruta entre el 4 y 12 % son semillas las cuales contienen aproximadamente un 30 % de aceite [2]. La parchita es usada en la producción de jugo, generando una gran cantidad de desechos alcanzando hasta un 40 % de las frutas procesadas [3, 4], de esta cerca del 90 % son semillas y conchas.

El aceite que se encuentra en las semillas de maracuyá tiene un alto contenido de ácidos grasos insaturados, especialmente ácido linoleico, así como tocoferoles, carotenoides y compuestos fenólicos, conocidos por tener actividad antioxidante [5]. Así, el potencial de reutilización de semillas de maracuyá para obtener ingredientes funcionales podría encontrar diversas aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, permitiendo la conversión de un residuo agroindustrial en productos de valor agregado [6].

La demanda de aceites de semillas de alta calidad asociada con el desarrollo actual del mercado de productos “bio”, “orgánicos”, “naturales” o “ecológicos” resultó en un aumento del interés en materias primas de aceite inusuales [7]. Diversas investigaciones han reportado actividad antimicrobiana de extractos de origen natural, algunos investigadores los han incorporado en formulaciones con propósitos farmacológicos como lo muestra el trabajo de Troncoso [8], quien diseñó una loción contra el acné empleando extractos de *Mangifera indica* y *Psidium guayava*, o el de Procopio [9], quien incorporó a un hidrogel un extracto glicólico de *Punica granatum L.*, o el de Cáceres [10], que formuló una crema a base de extracto hidroalcohólico de las hojas de *Schinus molle L.*, entre otros.

La propagación de enfermedades ocasionadas por el crecimiento de ciertos microorganismos patógenos, ha incrementado el uso de productos antibacteriales como los geles, que emplean como agente antimicrobiano el alcohol en altas concentraciones. Sin embargo, existen compuestos fitoquímicos que pueden ser obtenidos de frutas y semillas que presentan buena actividad antibacte-

rial y fungicida, entre otras.

La finalidad de esta investigación fue evaluar la incorporación del extracto de semillas de parchita en un hidrogel, para establecer las características que este aporta al producto final y su posible actividad antibacterial, como una alternativa a los geles a base de alcohol.

2. Metodología

2.1. Extracción de los compuestos bioactivos del material vegetal

Las parchitas (*Passiflora edulis var. flavicarpa*) maduras fueron adquiridas en un supermercado de la localidad (Maracay-Venezuela) y conservadas a temperatura ambiente hasta su procesamiento. Las frutas fueron lavadas, cortadas y se separaron las semillas de la pulpa. Estas fueron lavadas con abundante agua, para eliminar cualquier resto de la pulpa, y colocadas en estufa a 50 °C por 48 h, hasta peso constante. Las semillas secas fueron molidas, empleando un molino manual hasta obtener un tamaño de partícula de 1 mm. La extracción se realizó a reflujo total empleando como solvente etanol al 99 % (Sigma Aldrich). La relación sólido-líquido fue de 1:10, el proceso se realizó a 70 °C/3h. Se filtró empleando un papel Whatman No. 5, y luego se concentró empleando un evaporador (Büchi B- 480 Labortechnik AG, Suiza) a 78 °C.

2.2. Caracterización físico química del extracto

Al extracto obtenido se le realizó una Espectrofotometría de infrarrojos con transformada de Fourier (FTIR), con la finalidad de conocer los grupos funcionales empleando un espectrómetro modelo PARAGON 1000PC. También se le determinó la densidad (Covenin 703:2001) e índice de refracción (Covenin 702: 2001) y su solubilidad en alcoholes de diferentes polaridades (de etanol hasta octanol). La prueba de solubilidad consistió en colocar en un tubo de ensayo 1 mL del alcohol, y posteriormente se adicionaron 2 gotas de extracto crudo, se agitó suavemente y se verificó la disolución o no de la misma.

2.3. Determinación de fenoles totales

Los fenoles fueron determinados según el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (grado analítico, Merck) y la metodología propuesta por Marinova [11]. Se tomó un volumen de 50 μL del extracto al cual se le adicionaron 125 μL del reactivo de Folin-Ciocalteu, la mezcla se agitó y se dejó en reposo por 8 minutos. Posteriormente, se adicionaron 400 μL de carbonato de sodio (Na_2CO_3 al 7,1 %) y se completó con agua destilada hasta 2.000 μL . Después de 1 hora de reposo en oscuridad se leyó la absorbancia a 760 nm, empleando para ello un equipo de absorción molecular Génesis 20 (Thermo Scientific). En paralelo se prepararon soluciones de ácido gálico (Sigma-Aldrich®) entre 50–250 $\mu\text{g/mL}$ para construir la curva de calibración ($r^2 = 0,90$). Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por g de extracto ($\text{mg}_{\text{GAE}}/\text{g}_{\text{extracto}}$).

Se determinaron los flavonoides, donde 100 μL de muestra fueron mezclados con 30 μL de nitrato de sodio (NaNO_2 al 5 % (p/v)), 30 μL de cloruro de aluminio (AlCl_3 10 % (p/v)), 200 μL de hidróxido de sodio (NaOH a 1 M) y se completó con agua destilada hasta un volumen final de 2000 μL . Se prepararon cinco patrones de concentración de 50–250 $\mu\text{g/mL}$, a partir de una solución patrón madre. Se leyó la absorbancia a 510 nm. Los resultados fueron expresados como $\text{mg}_{\text{Catequina Equivalente}}/100 \text{ g}_{\text{material vegetal}}$. Todos los valores se presentan como la media de los análisis realizados por quintuplicado $\pm$ desviación estándar.

2.4. Elaboración y estabilidad del hidrogel

Los polímeros seleccionados para la elaboración del hidrogel fueron la carboximetil celulosa (CMC) y el polietilenglicol (PEG), empleando como agente entrecruzante el ácido cítrico (AC). Se fijó la concentración de CMC 3 % según lo planteado por Velásquez [12], mientras que para seleccionar la concentración del PEG y AC se propuso un diseño de experimento factorial 3^2 , con una réplica. Los niveles seleccionados fueron 5,10 y 20 % (m/m) tomando como referencia la investigación de Cuadrado [13]. El resultado es analizado por la metodología de superficie

de respuesta, siendo la variable respuesta la estabilidad del gel medida en días. Los resultados obtenidos fueron analizados empleando el software estadístico Statgraphic plus 5.1 (versión prueba). Se consideró un gel inestable o fluido cuando la red polimérica colapsa en el tiempo. Para determinar el punto de fluidez se propuso un ensayo cualitativo, donde una porción del gel se colocó sobre una placa de vidrio inclinada 45° , si el gel permanece en la parte superior de la placa es considerado estable, mientras que si comienza a descender se considera inestable o fluido.

Se seleccionó la combinación de polímeros que proporcionó una mayor estabilidad en el tiempo, a esta se le incorporó el extracto, tomando como referencia la concentración mínima inhibitoria reportada por Noguera [14]. Para incorporarse a la matriz polimérica, el extracto es disuelto en 5 mL de alcohol isopropílico (70 % v/v). Al hidrogel obtenido se le determinó la viscosidad dinámica (Covenin 2775-93), con un viscosímetro de Brookfield digital RVT (spindle No. 6), y el grado de hinchamiento se realizó según la metodología modificada propuesta por Akalin y Pulat [15].

2.5. Efecto antibacterial del hidrogel

Se diseñó una prueba cualitativa que consistió en pasar un hisopo estéril sobre las manos antes y después de aplicar el hidrogel. Cada hisopo se colocó en un vial con medio Luria Bertani (LB) estéril, y se sembró usando la técnica de dispersión en placas sobre un medio LB-agar, estas fueron invertidas e incubadas $37^\circ\text{C}/24\text{h}$ y se observó si hubo crecimiento microbiano. Se empleó como referencia un gel antibacterial comercial y el gel sin extracto.

3. Resultados

3.1. Extracción y caracterización de los compuestos bioactivos del material vegetal

Bajo las condiciones de extracción se obtuvo un rendimiento del $(19,65 \pm 0,01)\%$, siendo este superior al obtenido por Noguera [16], quienes realizaron la extracción alcohólica por maceración al frío obteniendo un rendimiento del

3 %. Investigaciones precedentes reportan mejores rendimientos al cambiar el método o el solvente, como Malacrida y Jorge [6], quienes obtuvieron un rendimiento del 30,39 % al realizar una extracción por soxhlet usando éter de petróleo, o el estudio de Cardoso [17], quienes emplearon acetona en la extracción asistida por ultrasonido logrando un rendimiento del 23,8 %.

En el espectro infrarrojo (FT-IR) del extracto crudo mostrado en la Figura 1, se encontró un estiramiento de la banda $3.370,86\text{ cm}^{-1}$ que indica la presencia de un enlace O–H pudiendo ser un alcohol o fenol, las bandas identificadas entre $3.009,40\text{ cm}^{-1}$ y $2854,28\text{ cm}^{-1}$ están relacionadas con los grupos funcionales típicamente de ácidos carboxílicos, aminas, amidas primarias y secundarias. La banda $1.743,82\text{ cm}^{-1}$ característico del grupo carbonilo, mientras que la banda en $1.458,57\text{ cm}^{-1}$ representa la presencia de aromáticos en conjunto con la banda mayor a 3.000 . En general, el extracto presenta grupos fenólicos, grupos OH y grupos radicales.

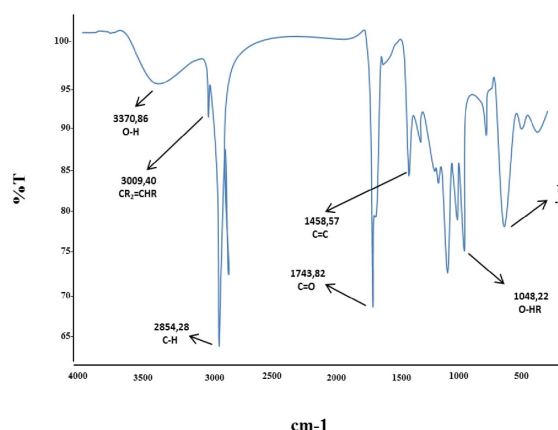


Figura 1: Espectro infrarrojo del extracto de la semilla de parchita

El extracto crudo presentó un color pardo oscuro, de aspecto poco viscoso y olor característico a parchita. La densidad e índice de refracción del extracto es comparado en la Tabla 1 con otras investigaciones realizadas sobre la *P. edulis flavicarpa*, donde el extracto se obtiene de las semillas. La diferencia entre las densidades puede deberse a la presencia de otros compuestos no cuantificados durante la extracción. En cuanto al

índice de refracción, utilizado como parámetro de control de calidad de un aceite, el valor obtenido es muy cercano a otras investigaciones, y se encuentra dentro del rango reportado para un aceite vegetal (1.465–1.468, Covenin 702:2001).

Tabla 1: Caracterización fisicoquímica del extracto de *P. edulis flavicarpa*

	Densidad (g/mL)	Índice de refracción
Extracto	$0,866 \pm 0,001$	$1,4667 \pm 0,0001$
Liu [18]	$0,9173 \pm 0,0102$	1,4731
Malacrida [6]	NR	$1,4682 \pm 0,0001$
Pereira [7]	0,9204	1,4680

El rendimiento y las propiedades fisicoquímicas de un extracto dependen del método y el solvente seleccionado al momento de la extracción.

3.2. Determinación de fenoles totales

En los extractos obtenidos de plantas se encuentran compuestos bioactivos, entre los que destacan los compuestos fenólicos, que aportan propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Al evaluar la presencia de estos en el extracto de parchita, se encontró un contenido de fenoles totales de $(64,45 \pm 0,01)\text{ mgGAE/gmuestra}$, estos valores son cercanos a los reportados en investigaciones previas, como Noguera [14], donde se reportaron valores de $(68,72 \pm 0,69)\text{ mgGAE/gmuestra}$, mientras Oliveira [4] para la misma especie de *P. edulis flavicarpa* reportaron $(75 \pm 2)\text{ mgGAE/gmuestra}$. Las investigaciones muestran que, en función del material vegetal, el método de extracción y el tipo de solvente utilizado, afecta el contenido de fenoles.

En lo que respecta al contenido de flavonoides, se encontró un contenido $(26,27 \pm 0,01)\text{ mgCatequina Equiv/100gmuestra}$, lo cual representa cerca del 43 % de los fenoles totales. Este valor es superior al indicado por López [19], en cuanto a los flavonoides en un extracto metanólico, obtenido a partir de semillas y pulpa de parchita, reportando $6,83\text{ mgCatequina Equiv/100gmuestra}$, mientras que Nugraha [20], indicaron solo cualitativamente la presencia de flavonoides en el extracto etanólico, además de otros compuestos fitoquímicos como

taninos, saponinas y esteroides. Sin embargo, recientemente Alves [21], reportaron para la *P. edulis* un contenido de flavonoides de 11,42 mg/g. Entre los principales flavonoides identificados en *P. edulis* se encuentran las vitexina, isovitexina, isoorientina, apigenina, quercetina, luteolina y sus derivados, que representan clases importantes de compuestos eficaces con propiedades biológicas y farmacológicas [22, 23].

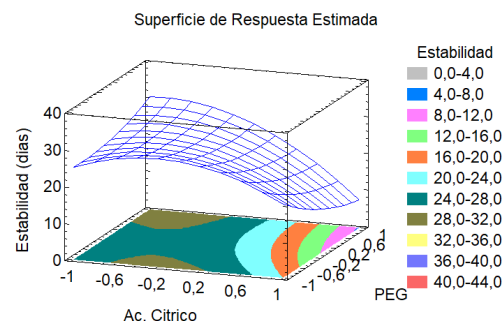
La *Passiflora edulis* ha sido la especie más analizada por su perfil fenólico. Los estudios, en total, identificaron 52 compuestos fenólicos, distribuidos en flavonoides (35 compuestos), fenólicosácidos (11 compuestos), estilbenos (cuatro compuestos) y cumarinas (un compuesto) en *P. edulis* [24]. Los extractos ricos en polifenoles, presentan varias aplicaciones de interés en la industria de alimentos como conservantes, capaces de inhibir el crecimiento bacteriano [25]. En la industria cosmética, el contenido fenólico de un aceite es utilizado para ayudar a retardar los diversos trastornos de la piel, como envejecimiento y daños ocasionados por quemaduras [26].

3.3. Elaboración y estabilidad del hidrogel

La elaboración del hidrogel se realizó entrecruzando la carboximetil celulosa (CMC) y el polietilenglicol (PEG) con ácido cítrico (AC), este último es un ácido tricarbónico capaz de formar enlaces covalentes entre las cadenas de polímeros por la presencia de grupos funcionales como $-OH$ y $-COOH$ presentes en los polímeros [27].

En el análisis de varianza mostrado en la Tabla 2, se encontró que solo el AC posee un efecto significativo ($p < 0,05$) lo que implica que la variación de la concentración de este afecta la estabilidad del hidrogel. En la Figura 2 se muestra la superficie de respuesta y el modelo matemático que maximiza la estabilidad del hidrogel en el tiempo, el modelo presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 73 %. La maximización de la respuesta se obtuvo para la concentración del 20 % PEG y 5 % AC, mientras la CMC se fijó en 3 %. Bajo estas condiciones se logró un producto estable por 30 días.

El hidrogel se preparó empleando las concentraciones que maximizan la estabilidad del mismo.



$$Est(días) = 25,556 - 7,083 \cdot AC - 1,750 \cdot PEG - 6,583 \cdot AC^2 - 4,500(AC \cdot PEG) + 1,927 \cdot PEG^2$$

Figura 2: Superficie de respuesta para la estabilidad del hidrogel

Al incorporar el extracto, este se torna ligeramente amarillento con un aroma al fruto de parchita. La capacidad de hinchamiento fue de 207,9 %, este valor es bajo en comparación con otros hidrogeles cuya capacidad se encuentra entre (1000–1200) % [12]. Sin embargo, Barrera [28] en su estudio encontró que la matriz polimérica usada fue muy compacta observando un grado de hinchamiento de 620 ± 5 % ($pH = 7$) y 500 ± 10 % ($pH = 3$) a 40 h de un hidrogel formulado con polivinil, ácido succínico y ácido clorhídrico. En cuanto, a la viscosidad del hidrogel fue de (25200 ± 1) cP, siendo más fluido que un gel comercial a base de alcohol cuya viscosidad fue (30,0001) cP, esta característica le permite esparcirse con menor esfuerzo al momento de su aplicación.

En la Figura 3, se muestran los espectros FT-IR para un hidrogel con y sin extracto y se compararon las bandas de absorción, encontrándose similitudes entre los mismos. Sin embargo, resalta una banda en $2925,10 \text{ cm}^{-1}$ correspondiente al grupo fenólico. Esto pudiese sugerir que el extracto quedó ocluido en la red polimérica. La interacción entre los polímeros y el extracto viene dada por fuerzas intermoleculares del tipo puentes de hidrógeno, fuerzas de van der Waals, que lo mantienen unidas a las moléculas. Un fenómeno parecido fue observado por González [29], quienes evaluaron el FT-IR de un hidrogel (poliacrilamida/polihidroxibutirato-

Tabla 2: Análisis de Varianza para Estabilidad

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Acitrico	602,083	1	602,083	14,74	0,0028
B:PEG	36,75	1	36,75	0,9	0,3632
AA	173,361	1	173,361	4,24	0,0639
AB	162	1	162	3,97	0,0718
BB	14,6944	1	14,6944	0,36	0,5608
Bloque	174,222	1	174,222	4,27	0,0633
Error total	449,333	11	40,8485		
Total (corr.)	1612,44	17			

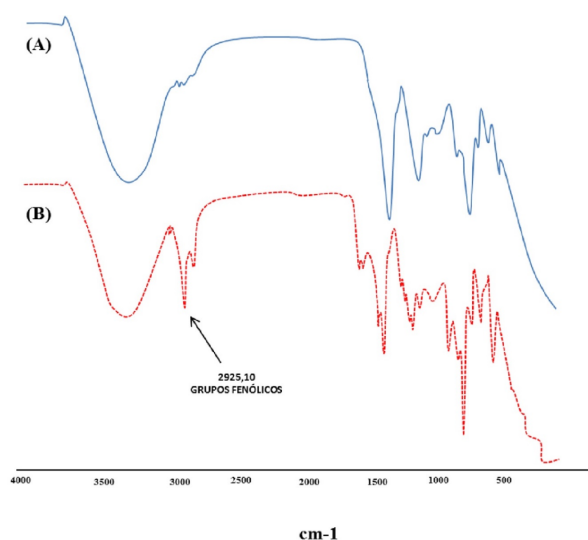


Figura 3: Espectro infrarrojo del gel formulado. (A) línea negra sin extracto, (B) línea roja con extracto de *Passiflora edulis*

cohidroxivalirato) con la incorporación de un biopolímero, y observaron la aparición de una banda en el espectro del gel que correspondía al biopolímero. Los resultados obtenidos mostraron que fue posible incorporar el extracto de la semilla de *Passiflora edulis* al hidrogel, las bandas reflejan la presencia de grupos fenólicos que pueden atribuir propiedades antioxidantes y antibacteriales al mismo.

3.4. Efecto antibacterial del hidrogel

Para establecer la posible acción antibacterial del gel, se realizó una comparación cualitativa entre el hidrogel con y sin extracto, y un gel comercial adquirido en el mercado. En la Figura 4a se muestra el hisopado realizado antes de aplicar

el hidrogel, en esta se evidencia el crecimiento de microorganismos. Al aplicar el hidrogel sin extracto que contiene solo un 5 % de alcohol, se observó también un crecimiento, pero en menor proporción a la referencia o muestra sin gel como se observa en la Figura 4b, la cantidad de alcohol presente no es suficiente para inhibir el crecimiento en el medio.

Sin embargo, al aplicar el gel con extracto se encontró que este es capaz de inhibir el crecimiento de microorganismo, como se observa en la Figura 4c, es decir, la sustancia bioactiva incorporada inhibe el crecimiento de microorganismos evidenciando así un efecto antibacterial. El mismo efecto antibacterial se observó en la Figura 4d donde se emplea un gel comercial a base de alcohol. Tanto el gel con extracto como el comercial muestran un efecto bacteriostático sobre el crecimiento de microorganismos.

Se conoce que los extractos puros poseen propiedades antimicrobianas, según lo indicado por Noguera [14, 16], y López-Vargas [30]. En esta investigación la inclusión de sustancias bioactivas como polifenoles en redes poliméricas no interfiere con su acción antimicrobiana, o antioxidante. S. Shanmugam y T. Parimelazhagan [31], afirman que la inclusión de estos compuestos en las formulaciones desarrolladas en la industria farmacéutica o de alimentos le proporciona propiedades que incluyen capacidad antioxidante, antiinflamatoria, analgésica, antiespasmódica, y antimicrobianas [31].

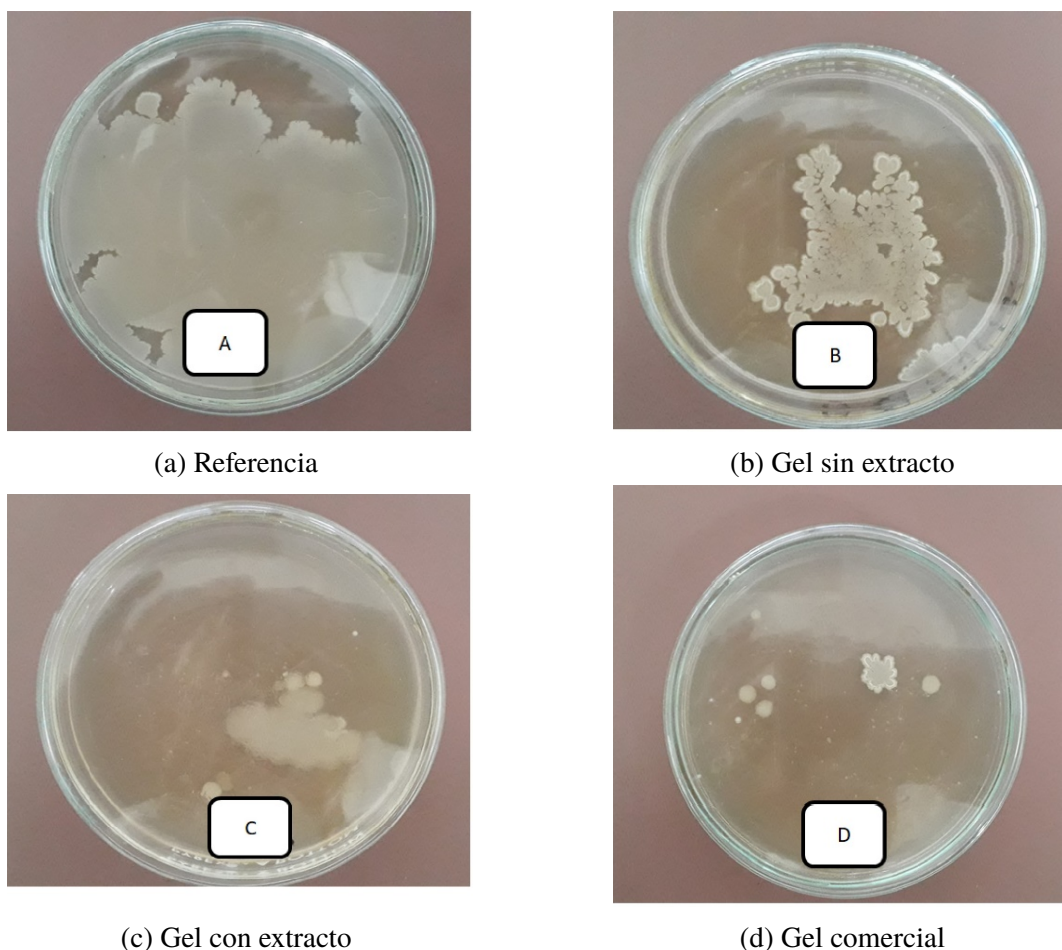


Figura 4: Crecimiento de microorganismos en placa antes y después de aplicar el gel

4. Conclusión

La concentración del agente entrecruzante tiene un rol relevante en la estabilidad del hidrogel en el tiempo, al igual que en su capacidad de hinchamiento. El hidrogel presentó una apariencia viscosa, pero de fácil esparcimiento sobre una superficie, con un aroma a parchita. La incorporación del extracto además de proporcionar características físicas favorables, le confiere propiedades antibacteriales que provocan un efecto bacteriostático sobre el crecimiento de microorganismo. Además, los compuestos fitoquímicos como los polifenoles y flavonoides le aportan propiedades antioxidantes que son importantes en el cuidado de la piel. La inclusión de estos compuestos es una buena alternativa a los geles a base de alcohol.

Por otra parte, se encontró que las redes poliméricas como los hidrogeles son buenos vehículos

al momento de transportar moléculas bioactivas permitiendo que su actividad antimicrobiana o antioxidante no se vea afectada.

5. Referencias

- [1] K. Dhawan, S. Dhawan, and A. Sharma, “*Passiflora*: a review update,” *Journal Ethnopharmacol*, vol. 94, no. 1, pp. 1–23, 2004.
- [2] D. Oliveira, M. Angonese, C. Gomes, y S. Ferreira, “Valorization of passion fruit (*Passiflora edulis* sp.) by product: Sustainable recovery and biological activities,” *The Journal of Supercritical Fluids*, vol. 11, pp. 55–62, 2016.
- [3] J. Amaya, *El Cultivo del Maracujá (*Passiflora edulis* form. *Flavicarpa*)*. La Libertad, Trujillo-Perú: Gerencia Regional Agraria, 2009.
- [4] J. Lousada, J. Correia, J. Miranda, and N. Rodríguez, “Caracterização físico-química de subprodutos obtidos doprocessamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento na alimentação animal,” *Revista Ciência Agronômica*, vol. 37, no. 1, pp. 70–76, 2006.

- [5] B. S. Ferreira, C. G. De Almeida, L. P. Faza, A. De Almeida, C. G. Diniz, V. L. Da Silva, R. Grazul, and M. Le Hyaric, "Comparative properties of amazonian oils obtained by different extraction methods," *Molecules*, vol. 16, pp. 5874–5885, 2011.
- [6] C. Malacrida and J. Neuza, "Yellow passion fruit seed oil (*Passiflora edulis f. flavicarpa*): physical and chemical characteristics," *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 127–134, 2012.
- [7] M. G. Pereira, G. M. Maciel, C. W. I. Haminiuk, F. Bach, F. Hamerski, A. Scheer, and M. Corazza, "Effect of Extraction Process on Composition, Antioxidant and Antibacterial Activity of Oil from Yellow Passion Fruit (*Passiflora edulis* Var. *Flavicarpa*) Seeds," *Waste Biomass Valor*, vol. 10, pp. 2611–2625, 2019.
- [8] M. Troncoso, S. Gajardo, J. Benites, J. Lopez, y M. Arredondo, "*Mangifera indica* y *Psidium guayava*: determinación de la actividad antimicrobiana de las cáscaras liofilizadas en la formulación de una loción hidroalcohólica para el acné," *BIOFARBO*, vol. 18, no. 2, pp. 1–9, 2010.
- [9] L. Procopio, "Avaliação da biocompatibilidade e atividade antimicrobiana in vitro da matriz de hidrogel associada ao extrato glicólico de *Punica granatum* L. (romã)," Dissertação apresentada parte dos requisitos para obtenção do título de M.Sc. em Biopatologia Bucal, Área de Microbiologia e Imunologia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2017.
- [10] F. Cáceres, "Formulación de una crema a base de extracto hidroalcohólico de las hojas de *Schinus molle* L. (*molle*)," Tesis para obtener el título profesional de Químico farmacéutico, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga-Perú, 2018.
- [11] D. Marinova, F. Ribarova, and M. Atanasova, "Total phenolics and total flavonoids in bulgarian fruits and vegetables," *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 40, no. 3, pp. 255–260, 2005.
- [12] I. Velásquez, R. Camacaro, y D. Dasniel, "Evaluación de la capacidad antimicrobiana de sales de amonio cuaternario en un hidrogel," *Ingeniería y Sociedad UC*, vol. 13, no. 2, pp. 152–161, 2018.
- [13] P. de Cuadro, T. Belt, K. S. Kontturi, M. Reza, E. Kontturi, T. Vuorinen, and M. Hughes, "Crosslinking of cellulose and poly(ethylene glycol) with citric acid," *Reactive & Functional Polymers*, vol. 90, pp. 21–24, 2015.
- [14] N. Noguera-Machado, L. Ojeda, M. Jiménez, M. Kremisisky, I. Velásquez, y F. Pacheco, "Evaluación del extracto hidroalcohólico de las semillas de *Passiflora Edulis* y su efecto sobre el crecimiento de *Escherichia coli* (ATCC 25922)," *Revista Saber UDO*, vol. 31, pp. 248–255, 2019.
- [15] G. Akalin and M. Pulat, "Preparation and Characterization of Nanoporous Sodium Carboxymethyl Cellulose Hydrogel Beads," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [16] N. Noguera, L. Ojeda, M. Jiménez, y M. Kremisisky, "Evaluación del potencial antibacteriano de extractos de semillas de cinco frutas tropicales," *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 2017.
- [17] R. Cardoso, S. Davantel, and M. Gimenes, "The extraction of passion fruit oil with green solvents," *Journal Food Engineering*, vol. 117, no. 4, pp. 458–463, 2013.
- [18] S. Liu, F. Yang, J. Li, C. Zhang, H. Ji, and P. Hong, "Physical and chemical analysis of *Passiflora* seeds and seed oil from China," *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, vol. 59, no. 7, pp. 706–715, 2008.
- [19] J. López, J. Fernández, J. Pérez, and M. Viuda, "Chemical, physicochemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis f. flavicarpa*) co products," *Food Research International*, vol. 51, pp. 756–763, 2013.
- [20] S. Nugraha, A. Suryadi, and E. Sitompul, "Antibacterial activity of ethanol extract of purple passion fruit peel (*Passiflora edulis* Sims) on *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*," *Indonesian Journal Pharmacy. Clinical. Research*, vol. 1, no. 2, pp. 29–34, 2018.
- [21] J. Alves, J. Márquez, D. P. Demarque, L. Costa, J. Amaral, N. Lopes, A. da Silva-Junior, L. Soares, E. Gavioli, L. Ferreira, and S. Zucolotto, "Involvement of Isoorientin in the Antidepressant Bioactivity of a Flavonoid-Rich Extract from *Passiflora edulis f. flavicarpa* Leaves," *Revista Brasileira de Farmacognosia*, vol. 30, pp. 240–250, 2020.
- [22] F. Xu, C. Wang, L. Yang, H. Luo, W. Fan, C. Zi, F. Dong, J. Hu, and J. Zhou, "C-dideoxyhexosyl flavones from the stems and leaves of *Passiflora edulis* Sims," *Food Chemistry*, vol. 136, no. 1, pp. 94–99, 2013.
- [23] J. Zhang, R. Koike, A. Yamamoto, M. Ukiya, M. Fukatsu, N. Banno, M. Miura, S. Motohashi, H. Tokuda, and T. Akihisa, "Glycosidic inhibitors of melanogenesis from leaves of *Passiflora edulis*," *Chemistry & Biodiversity*, vol. 10, no. 10, pp. 1851–1865, 2013.
- [24] I. Gadioli, M. Barreto, M. Oliveira, A. Costa, and L. Lacerda, "A systematic review on phenolic compounds in *Passiflora* plants: Exploring biodiversity for food, nutrition, and popular medicine," *Journal Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 58, no. 5, pp. 785–897, 2018.
- [25] A. Olszewskaa, A. Gędasa, and M. Simões, "Antimicrobial polyphenol-rich extracts: Applications and limitations in the food industry," *Food Research International*, vol. 134, p. 109214, 2020.
- [26] M. Dzialo, J. Mierziak, U. Korzun, M. Preisner, J. Szopa, and A. Kulma, "The Potential of Plant Phenolics in Prevention and Therapy of

- Skin Disorders,” *International Journal of Molecular Science*, vol. 17, no. 2, p. 160, 2016.
- [27] D. Soto y H. Oliva, “Métodos para preparar hidrogeles químicos y físicos basados en almidón: Una revisión,” *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 32, no. 2, pp. 154–175, 2012.
- [28] C. Barrera, “Síntesis y evaluación antimicrobiana de una formulación basada en hidrogel con propiedades “Slow Release”, de ampicilina frente a cepas de *Escherichia coli*,” Memoria para optar al grado de Licenciado en Tecnología Médica, Universidad de Talca, Chile, 2019.
- [29] N. González, A. El-Halah, J. M. Contreras, y B. Rojas, “Estudio de la capacidad de absorción en hidrogeles semiinterpenetrados de poliacrilamida/poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalirato),” *Revista Colombiana de Química*, vol. 47, no. 3, pp. 5–12, 2018.
- [30] J. López-Vargas, J. Fernández, A. Pérez, and M. Viuda, “Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber power obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *Flavicarpa*) co-products,” *Food Research International*, vol. 51, no. 2, pp. 756–763, 2013.
- [31] S. Shanmugam and T. Parimelazhagan, “Total phenolic content, Free radical scavenging and Antimicrobial activities of *Passiflora subpeltata* seeds,” *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, vol. 3, no. 4, pp. 67–72, 2013.

Design of low power fast full adder using Domino Logic based on magnetic tunnel junction (MTJ) and memristor

Pooria Parvizi ^a , Reza Sabbaghi-Nadooshan ^{*,b} , Mohammad Bagher Tavakoli ^a 

^aElectrical Engineering Department, Islamic Azad University of Arak, Arak, Iran.

^bElectrical Engineering Department, Islamic Azad University Central Tehran Branch, Tehran, Iran.

Abstract.- Domino CMOS circuits are widely used in high-performance very large scale integrated (VLSI) systems. The topology of domino circuits for high-speed operation, lower power consumption and robustness is of great importance in designing digital systems. The present paper proposes a low-power high-speed full adder circuit, which uses a new CMOS domino logic family based on magnetic tunnel junction (MTJ) elements and memristor in gate diffusion input (GDI) technique. In comparison with a static CMOS logic circuit, a dynamic logic circuit is of importance since it provides higher speed and requires fewer transistors. In comparison with the recently proposed circuits for dynamic logic styles, very low dynamic power consumption and less delay are the features of the proposed circuit. The problem with dynamic circuits is the lack of a stable output at different times, while the proposed circuit preserves the output value using memory elements such as MTJ and memristor during the clock cycle. The proposed technique shows a maximum power consumption of 0,317 μ W in MTJ/memristor-based full adders. Moreover, the proposed technique shows a maximum delay of 0,35 ns. The proposed full adder is simulated, and its power dissipation and performance are analyzed using HSPICE in standard 7 nm CMOS technology.

Keywords: MTJ; Memristor; Domino Logic; Full Adder.

Diseño de sumador completo rápido de baja potencia utilizando Domino Logic basado en Unión de Túnel Magnético (UTM) y Memristor

Resumen.- Los circuitos CMOS de Domino se utilizan ampliamente en sistemas integrados de gran escala (VLSI) de alto rendimiento. La topología de los circuitos dominó para operación de alta velocidad, menor consumo de energía y robustez es de gran importancia en el diseño de sistemas digitales. El presente artículo propone un circuito sumador completo de baja potencia y alta velocidad, que utiliza una nueva familia lógica de dominó CMOS basada en elementos de unión de túnel magnético (UTM) y memristor en la técnica de entrada de difusión de puerta (GDI). En comparación con un circuito lógico CMOS estático, un circuito lógico dinámico es importante ya que proporciona una mayor velocidad y requiere menos transistores. En comparación con los circuitos propuestos recientemente para estilos lógicos dinámicos, las características del circuito propuesto son un consumo de energía dinámica muy bajo y menos retardo. El problema con los circuitos dinámicos es la falta de una salida estable en diferentes momentos, mientras que el circuito propuesto conserva el valor de salida utilizando elementos de memoria como UTM y memristor durante el ciclo de reloj. La técnica propuesta muestra un consumo máximo de energía de 0,317 μ W en sumadores completos basados en MTJ/Memristor. Además, la técnica propuesta muestra un retraso máximo de 0,35 ns. Se simula el sumador completo propuesto, y su disipación de potencia y rendimiento se analizan utilizando HSPICE en tecnología CMOS estándar de 7 nm.

Palabras clave: MTJ; Memristor; Domino Logic; Sumador completo.

Received: August 25, 2020.

Accepted: September 21, 2020.

1. Introduction

In last few years, the use of internet of things (IoT) devices, cell phones, tablets and

sensors has been dramatically increased. Most of these devices are battery-powered, so power consumption (battery life) can be considered as a design challenge. Consequently, researchers have attempted to present new techniques to design low-power electronics [1]. Non-conventional CMOS and nano-technology pave the way for designing low-power electronics, which reduce the leakage

* Correspondence author:

e-mail: r_sabbaghi@iauctb.ac.i (R. Sabbaghi-Nadooshan)

power consumption, so low-power applications can rely on emerging technologies in this area [2]. For reducing dynamic power consumption, the energy stored in load capacitors can be recovered instead of being dissipated as heat. This technique is referred to as adiabatic (reversible) circuit design [3].

Magnetic tunnel junction (MTJ) is a non-volatile memory with short access time and small dimensions as well as compatibility with CMOS technology [4]. Thus, it is well suited for using in logic-in-memory (LiM) architectures. LiM structures use MTJs and are very suitable for low-power designs because of almost zero static power dissipation. A memristor is also used as a memory element in this paper to design 1-bit full adder based on domino logic, and the results are eventually compared with MTJ family. In the following of this section, we will introduce the works that have been done in these fields.

Low-power designs are of great importance as the demand for battery-operated portable devices is ever-increasing. In a large number of this type of devices, the battery life is more important than the operating speed. Nano-devices and adiabatic designs are used in LiM structures to reduce, respectively, the static and dynamic power consumption. As an emerging technology, MTJ has many advantages when used in LiM structures along with CMOS technology. Sharifi [5] introduces a new adiabatic hybrid MTJ/CMOS structure for designing AND/NAND, exclusive-OR (XOR)/XNOR and 1-bit full adder circuits. The power consumption of the proposed adiabatic MTJ/CMOS full adder is more than 7 times less than those of the previous MTJ/CMOS full adders. In [6], the presented domino logic is based on MTJ elements in gate diffusion input (GDI) technique. A dynamic logic circuit is more interesting than a static CMOS logic circuit since it has higher speed and requires fewer transistors. In comparison with the recently proposed circuits for dynamic logic styles, very low dynamic power consumption and less delay are the features of the proposed circuit. Additionally, the proposed circuit shows extreme fault tolerance. A Monte Carlo simulation proves the fault tolerance of the full adder proposed in this reference. Standard 0,18 μm CMOS technology

is used to simulate the proposed full adder. Both memory cell and sensing amplifier in this type of circuit, however, are less reliable, and this greatly limits the practical application of this type of circuit in logic computation. To resolve this issue, a new magnetic full adder (MFA) is presented in [7] based on pre-charge sensing amplifier (PCSA) and thermally assisted switching (TAS)-MTJ cell. Using the 65 nm CMOS technology and a precise TAS-MTJ model, mixed simulations are performed to show the high reliability while keeping low power consumption and small die area.

A few years ago, practical memristors were introduced and very soon attracted the interest of researchers and scientists. A memristor is the fourth basic two-terminal passive circuit element apart from well-known resistor, capacitor and inductor. Recently, memristor-based architectures have gained much attention from many researchers.

In this paper, we design memristor-based AND, OR and XOR gates. Using these gates, a memristor-based full adder circuit is proposed. The simulation results of the proposed circuit with these gates are reported. The remarkable improvements in the proposed circuit, compared to the conventional circuits, are lower power consumption by 54,74 %, less delay by 14,84 and using fewer transistors [8].

2. Background

The noise margin in domino logic is lower than that of static CMOS logic, so a relatively higher sensitivity towards noise source can be expected in domino logic circuits. Downscaling of the technology enhances noise immunity of domino logic circuits, while the power consumption of the circuit also increases. For reducing the consumed power, the supply voltage is scaled down, so the circuit delay increases. To compensate this delay, both the supply and threshold voltage scaling are performed. Reduction in the threshold voltage leads to a higher speed domino logic, while the noise immunity of the circuit decreases due to an increase in subthreshold leakage current [9, 10]. The thickness of the gate oxide is reduced as a result of downscaled technology, and this leads

to an exponential increase in gate leakage and subthreshold currents. These leakage currents may discharge the precharge node of domino circuits. Therefore, at high frequencies, leakage currents, low threshold voltage and noise sources degrade the performance of domino logic circuits [11].

Power consumption of CMOS full adders can be reduced by some techniques:

- Output and input capacitances can be minimized to reduce the dynamic power.
- Simultaneous use of both Vdd and GND in circuit components should be avoided to reduce the short and static power.
- For fewer transistors, we can use a pass transistor in a circuit; this reduces power consumption, while sometimes causes threshold losses.
- By varying the W/L ratio to minimize transistor conduction.

Various components of power consumption can be reduced by scaling down the device dimensions and supply voltage. The scaling down increases the leakage current due to the unfavorable short channel effects (SCEs) [12, 13, 14]. These effects decrease the effective channel length, which in turn, decreases the threshold voltage. Many research works have been conducted for reducing the power consumption in domino logic circuits [15, 16, 17].

2.1. Domino logic styles

To implement high-speed high-performance microprocessors, domino logic is more suitable than other dynamic logic styles since it requires less area and lower power [18]. Domino logic uses only one PMOS transistor in pull-up network (PUN) [13], so the area and the power consumption in domino logic is reduced compared to dynamic CMOS logic that uses n (number of inputs) PMOS transistors in the PUN.

The effects of leakage current and charge sharing on the dynamic node are prevented by the keeper transistor MK. The keeper ratio K is given by equation (1)

$$K = \frac{W_{Keeper}}{W_{PDN}}, \quad (1)$$

where W_{Keeper} is the keeper transistor width and W_{PDN} is the evaluation transistor width in the PDN. The upsizing of keeper transistor MK enhances the robustness of the circuit by trading off the speed performance [15].

The control of the keeper circuit uses the following items:

1. delayed enabling of the keeper circuit,
2. abrupt keeper control mechanism,
3. keeper control signal with voltage swing variation,
4. keeper mechanisms with process variation tolerance and
5. bias voltage variation of the keeper device.

Other topologies based on PDNs with an additional discharge path have also been proposed in the literature. This modification results in increased operating speed and reduction in leakage current [15, 19]. Figure 1 shows a conventional domino logic circuit.

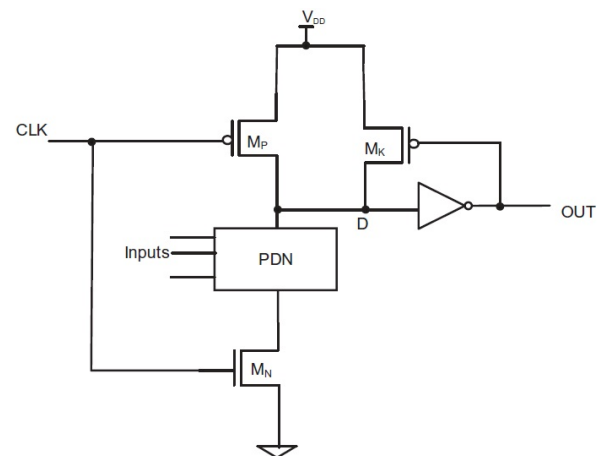


Figure 1: Conventional domino logic circuit

Figure 2a depicts a high-speed domino (HSD) logic [20]. In the leakage current replica (LCR) keeper technique shown in Figure 2b, an analog current mirror circuit controls the strength of the keeper device, which depends on the leakage current of PDN [21].

An additional keeper transistor and the existing conventional keeper transistor decrease the loop

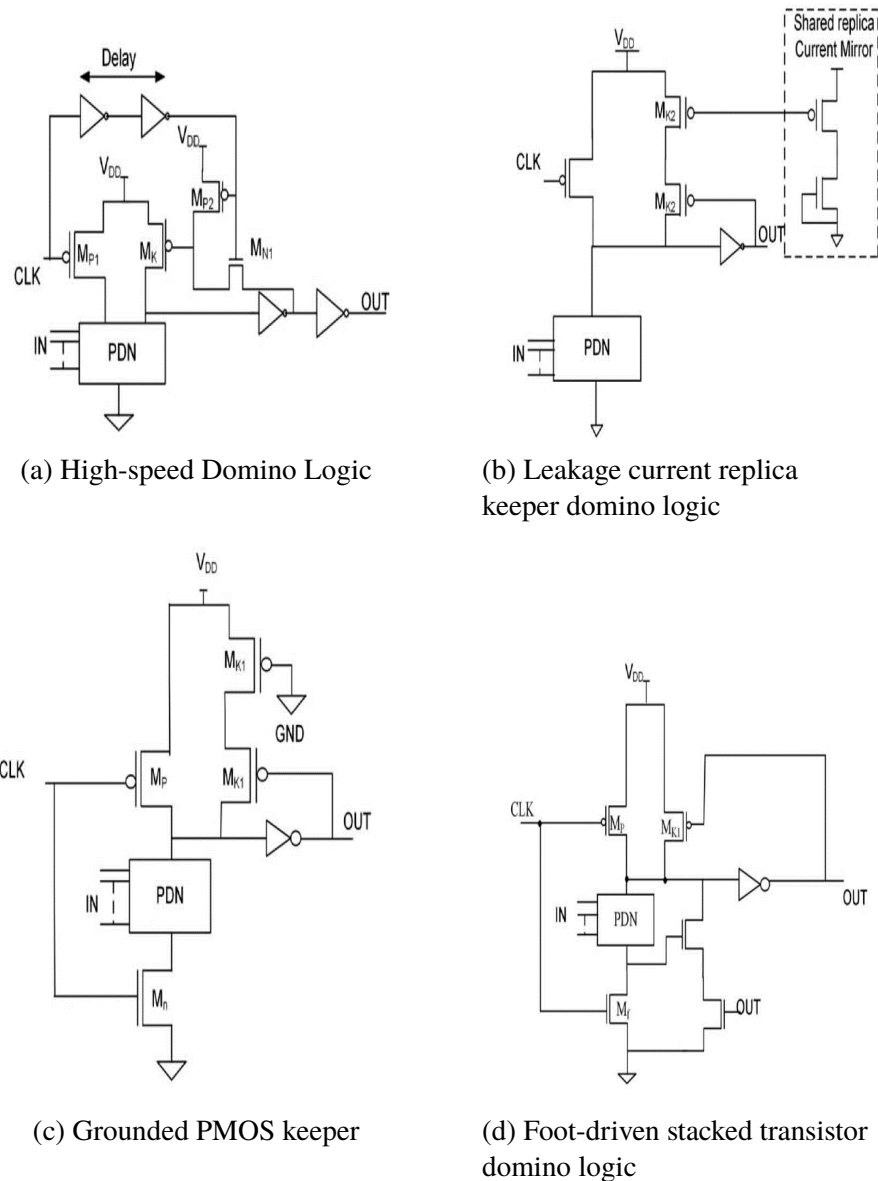


Figure 2: Existing domino logic circuit

gain and the delay variability in the grounded PMOS keeper structure depicted in Figure 2c [22]. The additional discharge path is controlled by the output and foot node voltages in foot-driven stacked transistor domino logic (FDSTDL) as shown in Figure 2d.

A CDDK circuit uses the principle of delayed enabling of keeper circuit, which consists of two PMOS keeper transistors in series. The delayed enabling of keeper circuit decreases the contention current between the keeper transistor and PDN. Therefore, if the PDN evaluates a TRUE condition, it facilitates faster discharge of the dynamic

nodal charge through PDN, and this increases the operating speed of the circuit. In domino logic circuits, variations in the process parameters and feedback loop gain contribute considerably to the delay variability [23, 24]. These issues emphasize the need for identifying appropriate improvement techniques.

2.2. Magnetic Tunnel Junction (MTJ) Review

Magnetic tunnel junction comprises two ferromagnetic (FM) layers and an oxide barrier layer sandwiched between these two layers (Figure 3). Parallel and antiparallel configurations can be

realized according to the FM layers alignment. These two configurations are behind the low resistance (RP) or high resistance (RAP) behaviors of MTJ [25]. Therefore, these behaviors can be used in LiM designs.

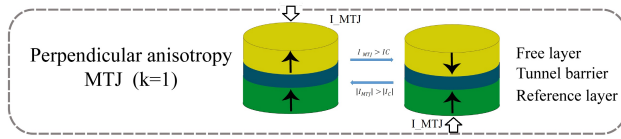


Figure 3: Vertical MTJ nanopillar structure. MTJ states change from P to AP and vice versa by applying a current (I_{MTJ}) higher than the critical current (I_C)

The techniques proposed for switching MTJ configurations are as follows: field induced magnetization switching (FIMS), thermally assisted switching (TAS) and spin torque transfer (STT). Spin torque transfer is the most promising technique, which is considered as a replacement for the other two techniques. This technique needs only a bi-directional low switching current. The states of the MTJ are switched when the current of MTJ (I_{MTJ}) becomes higher than a critical current [26]. FIMS is the conventional approach for switching MTJ states, RAP and RP, which depend on the applied magnetic field. The disadvantages of this method are high power consumption, poor selectivity and poor scalability, which result from high switching currents.

2.3. Memristor

Custom neuromorphic hardware platforms are of great interest for accelerating neural network algorithms since they can perform complex tasks that are analogous to the physical processes in biological nervous systems [27]. A fundamental feature of these systems is their capability to overcome the restrictions [28]. The modern CMOS technology is employed to mimic the behavior of neurons; however, the lack of a device for effectively performing synaptic operations has hindered the advancement in this area for several years.

We propose a domino logic architecture for memristor-based neuromorphic computing. The architecture uses a simple binary neuron activation function and the delay of memristor RC circuits to perform synaptic computations. Synchronization schemes are presented to communicate information between the layers of neural network, and a simple linear power model is developed to estimate the energy efficiency of the architecture for a particular network size.

2.3.1. Memristor Modeling

Chua and Kang introduced physical memristive devices; however, the area of memristors and memristive devices has not drawn any interest for more than 35 years. In 2008, the theory of memristive devices was developed by Hewlett Packard researchers, and this theory was implemented in TiO_2 resistive switches. Hewlett Packard researchers proposed a device, which was claimed to be similar to an ideal memristor when it came to the structure and behavior of the device.

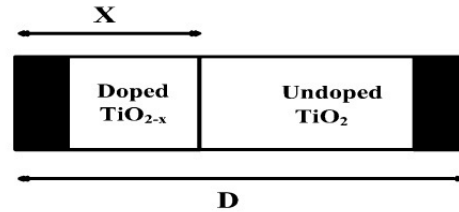


Figure 4: Hewlett Packard original device model



Figure 5: Equivalent circuit of memristor

The proposed structure is shown in Figure 4, and the equivalent electrical circuit of the memristor is shown in Figure 5. Time-dependent voltage and current can be expressed with equations (2), (3) and, (4) [29]:

$$v(t) = R(t) \cdot i(t) \quad (2)$$

$$R(t) = \frac{R_{on}w(t)}{D} + \frac{R_{off}(1 - w(t))}{D} \quad (3)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \frac{\mu v R_{on}}{D} \cdot i(t) \quad (4)$$

where R_{on} is the resistance for $x(t) = D$, and R_{off} is the resistance for $x(t) = 0$; $x(t)$ is the state variable over $[0, D]$.

Memristors are characterized by relatively short switching time, high endurance and low switching energy (typically 0,1–1 PJ), so memristive technologies are basically studied for memory applications [30, 31, 32, 33].

The symbol of memristor is shown in Figure 6. When current flows into (out of) the black strip, memristance decreases (increases) [34]. However, plotting the current flowing in the memristor versus the voltage across it results in a hysteresis loop (Figure 7), which is always pinched at the origin.

2.3.2. Physics Of Hysteresis Loop

Sinusoidal current $i(t)$ can lead to hysteresis. In this case, maxima and minima are shifted with respect to the corresponding memristor voltage $v(t)$. When both $i(t)$ and $v(t)$ become simultaneously zero, pinching occurs. The memristor can reach a maximum value of R_{off} and a minimum value of R_{on} . The maximum resistance can be expressed by the amplitude of input parameters. Many research works [35, 36, 37, 38, 39] have used mathematical models of memristor but a nonlinear dopant drift memristor model has been used for simulation of the proposed circuits [29].

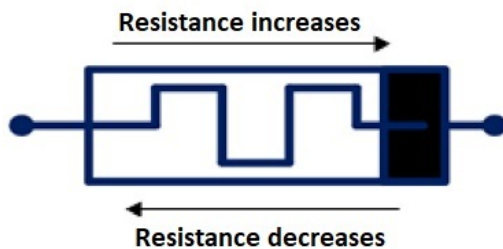


Figure 6: Symbol of memristor

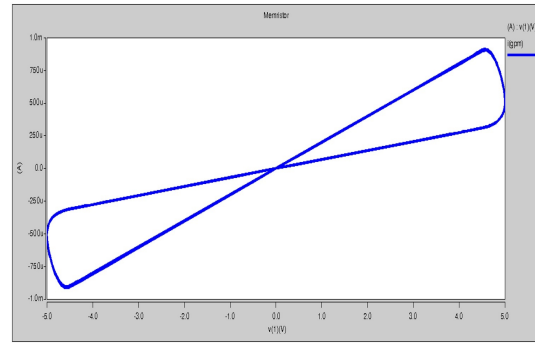


Figure 7: Hysteresis curve of memristor model (current-voltage pinched hysteresis loop)

2.4. Pseudo Domino Circuit

The pseudo domino logic outperforms domino logic because of precharge pulse propagation. A pseudo domino circuit [40] connects source node of the nMOS of the inverter to the drain terminal of the evaluation MOS at node A, instead of ground (Figure 8a). Thus, the value at node Z cannot propagate to the output node F in precharge phase, when the evaluation transistor N1 is off. This connection saves up to 32 % more power than conventional domino logic designs. This topology essentially improves the performance during the precharge phase. The pseudo domino logic circuit experience charge sharing and leakage issues because of short circuit paths. These issues can be resolved by using a keeper circuit.

The voltage drop at output node occurs because of charge sharing issue. In Figure 8b, when all inputs of pull-down network are equal to 1 in precharge phase, the threshold voltage drops at the output node Z. This voltage drop can be propagated to node F. The output voltage is redistributed on capacitances C1 and C2 as transistor N2 is ON. Therefore, the speed and power dissipation of the circuit are deteriorated, so a voltage drop occurs at output node F. If the value of output load capacitance C1 is equal to the node capacitance C2, then the voltage at output node reaches $VDD/2$.

Two methods can be used as solutions: 1) using a load capacitor with a capacitance much greater than any other charge sharing capacitance [40] and 2) using a keeper circuit [41]. Different keeper techniques are used in pseudo domino logic for power dissipation in this reference.

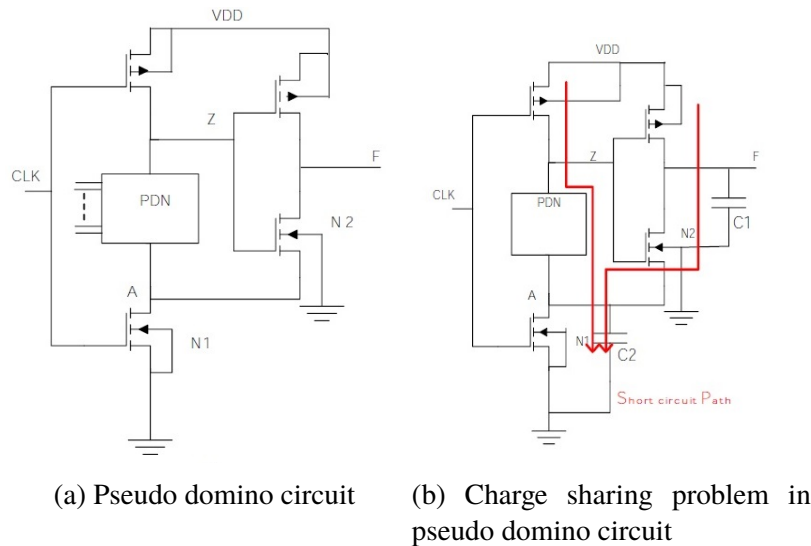


Figure 8: Pseudo domino

3. Proposed preamplifier topology

A new method is proposed in this section to design a domino logic. The proposed domino logic circuit shown in Figure 9, has a higher speed than conventional domino logic circuits.

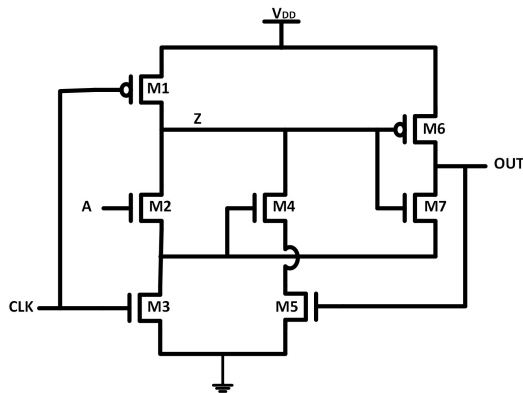


Figure 9: The proposed domino logic circuit

The circuit consists of two clock transistor elements. In this circuit, when the clock and A both are low, Z will be high and the output node will not change. The same is true when the clock is grounded and input A is high. When the clock and A both are high, both Z and the output will be high. When the clock is high and input A is low, Z will not change. In this condition, if Z is high (grounded), the output will be low (high).

Now, a full adder based on the novel domino logic circuit as well as MTJ and memristor

components as shown in Figure 10. In the proposed circuit, MTJ components are used in the output inverter to improve the circuit performance to stay at stable values. Additionally, to reduce the delay due to the use of memory elements in these circuits, we use discharge transistors to remove the electric charge from the z-storage node. This reduces the power consumption and delays the main nodes.

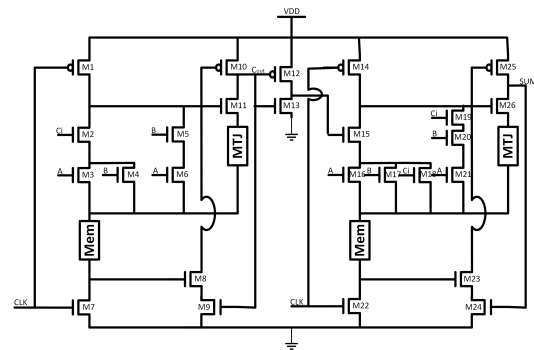


Figure 10: Schematic of the proposed final full adder based on MTJ and memristo

4. Simulation results

The simulation results of the proposed domino logic and full adder are presented in this section.

Figure 11 shows the simulation results of the proposed domino logic. The delay of this domino is plotted in Figure 12. As can be seen, the delay of this circuit is about 2 ns.

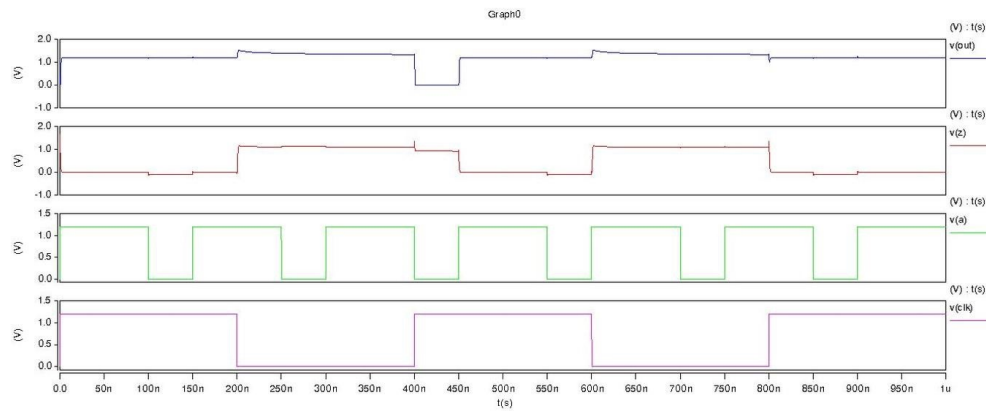


Figure 11: Simulation results of the proposed domino logic

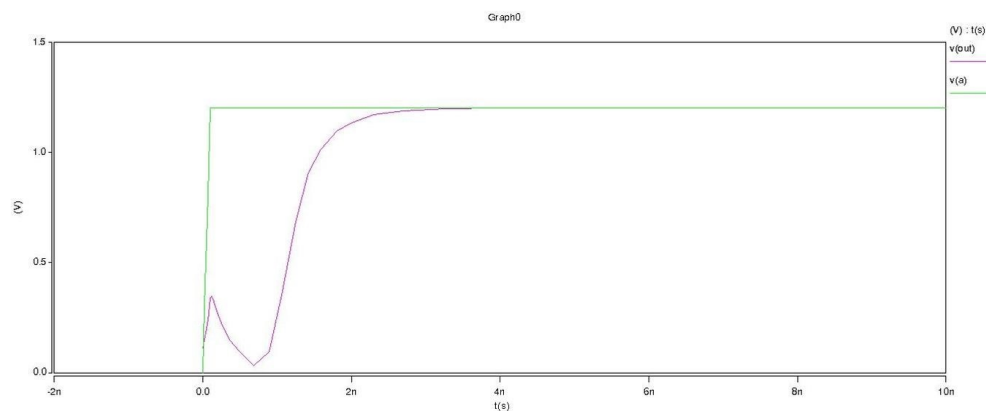


Figure 12: Delay of the proposed domino

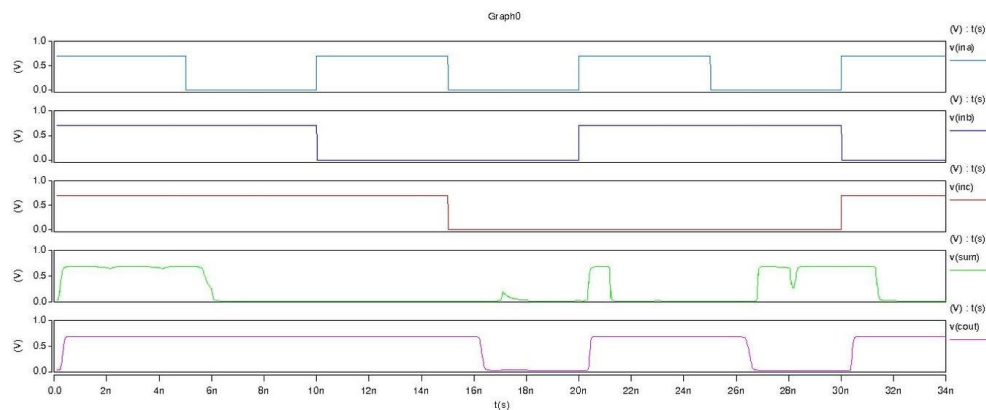


Figure 13: Simulation result of the proposed full adder based on memristor and MTJ

Figure 13 shows the simulation results of the proposed full adder based on memristor and MTJ. As can be seen, when all inputs are high, the sum of both outputs and $Cout$ are high. When two inputs are high and the other input is low, one output is low and the other is high.

In Table 1, a comparison is made between the proposed full adder and those in other works.

To show the stability of the circuit against voltage fluctuations, the circuit output for different values of voltage is investigated. Figures 15, 16 and 17 show the circuit output for 0,5; 0,9 and 1,2V

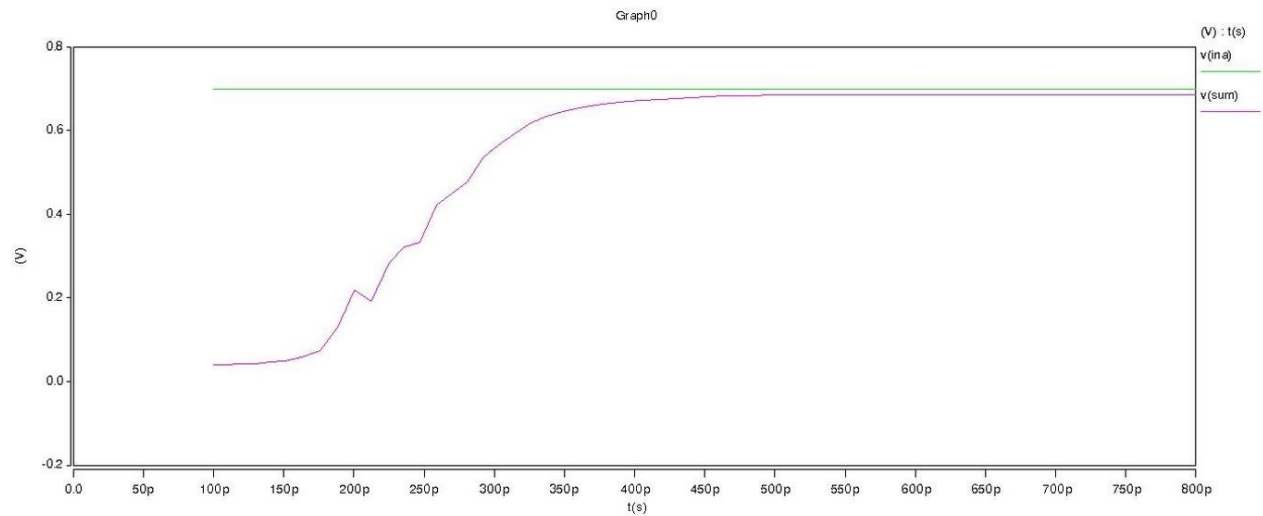


Figure 14: Delay of the proposed full adder

Table 1: Comparison of the proposed full adder and those in other references

Paper	Voltage supply (v)	Power consumption (μw)	Delay (ns)	Technology
5	0,9	0,12	1	32nm CMOS
6	2,5	0,447	0,35	180nm CMOS
43		1730	1,009	
44		5,736	0,179	
45		127	1,117	
This work (MTJ&MEM)	0,7	0,317	0,35	7nm CMOS

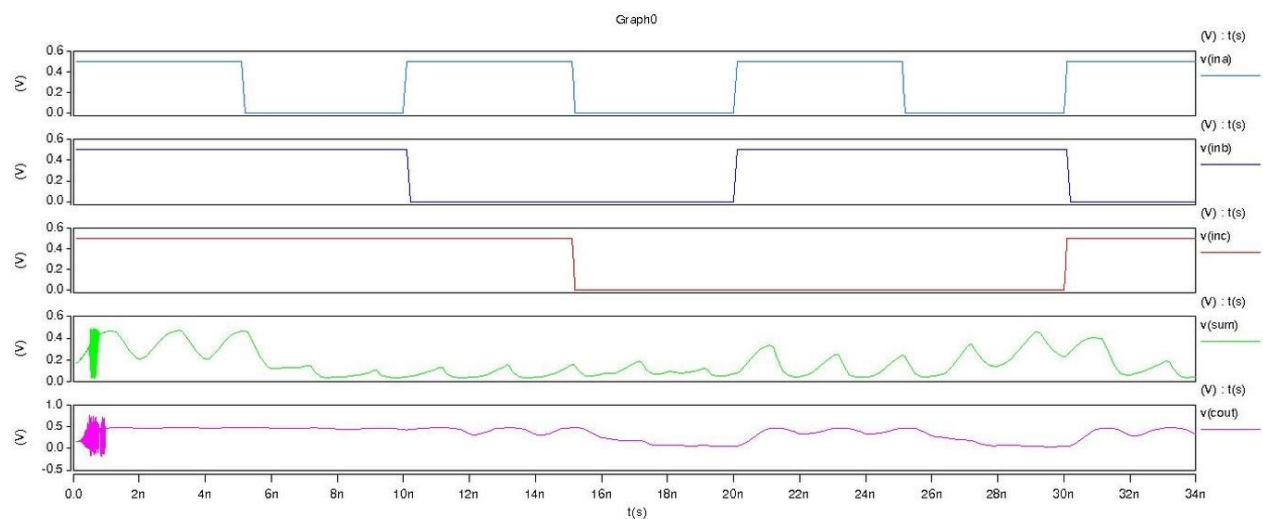


Figure 15: Simulation result of the proposed full adder for 0.5v

respectively.

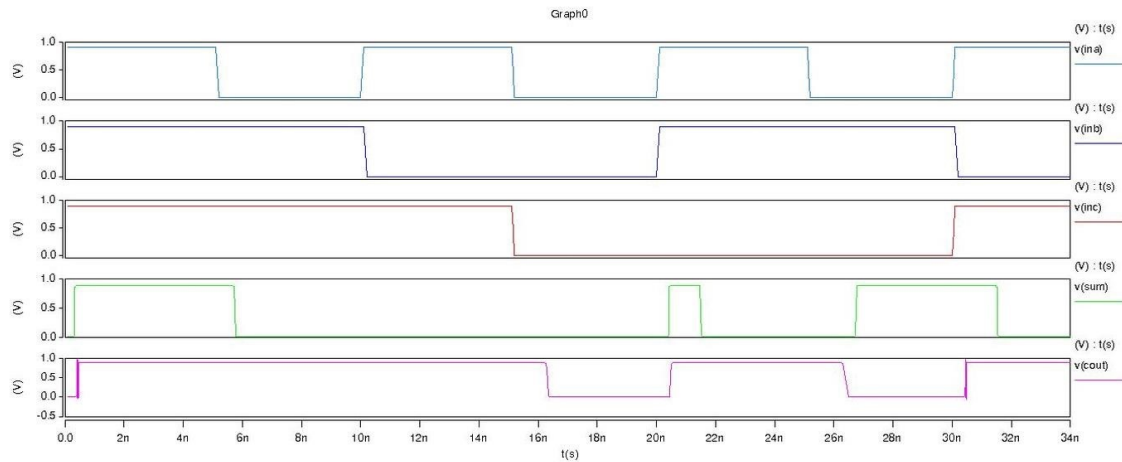


Figure 16: Simulation result of the proposed full adder for 0.9v

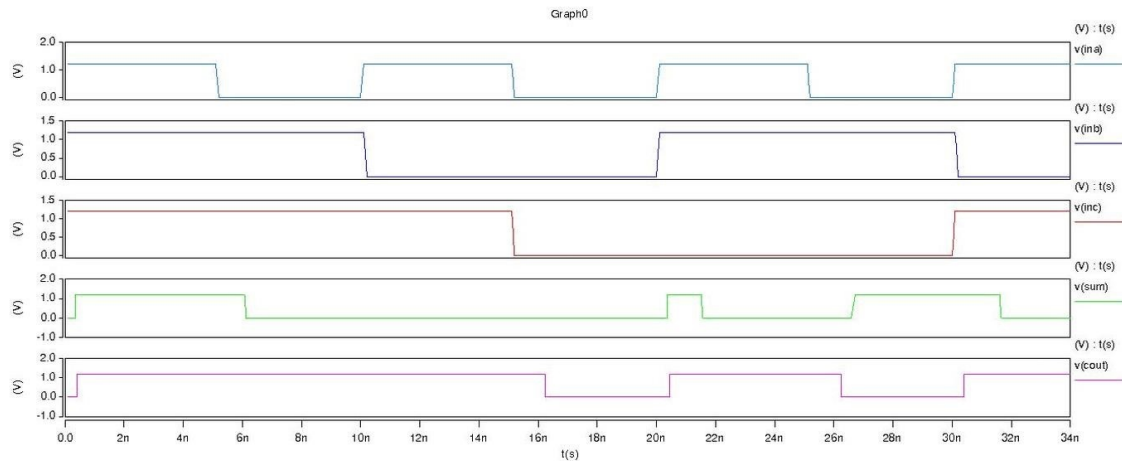


Figure 17: . Simulation result of the proposed full adder for 1.2v

5. Conclusion

A new low-power high-speed full adder circuit, which uses a new CMOS domino logic family, was presented in this paper. A new structure for adiabatic hybrid MTJ and MEM-CMOS circuits was also presented in this work. Moreover, the proposed full adder was compared with other previously presented basic logic gates and full adders. The advantages of the proposed circuits were their simpler architecture, lower power consumption, higher speed and using fewer transistors. The designs were simulated and compared with several state-of-the-art designs. We used Synopsys HSPICE simulator with 7 nm technology files to test the presented designs. The results showed the lower power consumption of the

proposed adiabatic MTJ-CMOS designs compared to state-of-the-art designs. In the final full adder circuit, sustainable outputs with optimal power consumption were achieved for hybrid structure of memristor and MTJ. Accordingly, the results of outputs indicated the feasibility of an optimal full adder design.

6. References

- [1] M. Pedram and J. M. Rabaey, *Power aware design methodologies*. Boston, MA, USA: Springer Science & Business Media, 2002.
- [2] Y. Zhang, W. Zhao, J. O. Klein, W. Kang, D. Querlioz, Y. Zhang, D. Ravelosona, and C. Chappert, "Spintronics for low-power computing," in *DATE '14: Proceedings of the conference on Design, Automation & Test in Europe*, Leuven, BEL, 2014.

- [3] W. C. Athas, L. J. Svensson, J. G. Koller, N. Tzartzanis, and E. Y. C. Chou, "Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 398–407, 1994.
- [4] E. Deng, Y. Zhang, J. O. Klein, D. Ravelsona, C. Chappert, and W. Zhao, "Low power magnetic full-adder based on spin transfer torque MRAM," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 49, pp. 4982–4987, 2013.
- [5] F. Sharifi, Z. Saifullah, and A. H. Badawy, "Design of adiabatic MTJ-CMOS hybrid circuits," in *2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2017, pp. 715–718.
- [6] S. j. Jassbi and m. mousavi, "A Novel Low Power Full Adder Using a Modified Domino Logic," *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, vol. 4, no. 6, pp. 8–11, 2016.
- [7] Y. Gang, W. Zhao, J. Klein, C. Chappert, and P. Mazoyer, "A High-Reliability, Low-Power Magnetic Full Adder," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 11, pp. 4611–4616, 2011.
- [8] M. Anis, S. Areibi, and M. Elmasry, "Design and optimization of multithreshold CMOS (MTCMOS) circuits," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 22, no. 10, pp. 1324–1342, 2003.
- [9] M. J. Gitanjali, "Efficient adders for assistive devices," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 1, pp. 95–104, 2017.
- [10] K. Roy, S. Mukhopadhyay, and H. Mahmoodi-Meimand, "Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 2, pp. 305–327, 2003.
- [11] S. H. Choi, B. C. Paul, and K. Roy, "Dynamic noise analysis with capacitive and inductive coupling [high-speed circuits]," in *Proceedings of ASP-DAC/VLSI Design 2002. 7th Asia and South Pacific Design Automation Conference and 15th International Conference on VLSI Design*, 2002, pp. 65–70.
- [12] S. M. Sharroush, Y. S. Abdalla, A. A. Dessouki, and E. A. El-Badawy, "Impact of technology scaling on the performance of domino CMOS logic," in *2008 International Conference on Electronic Design*, 2008, pp. 1–7.
- [13] M. J. Garima and H. Lohani, "Design, implementation and performance comparison of multiplier topologies in power-delay space," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 271–278, 2016.
- [14] M. H. Moaiyeri, M. Nasiri, and N. Khastoo, "An Efficient ternary serial adder based on carbon nanotube FETs," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 355–363, 2016.
- [15] F. Moradi, T. V. Cao, E. I. Vatajelu, A. Peiravi, H. Mahmoodi, and D. T. Wisland, "Domino logic design for high performance and leakage-tolerant applications," *Integration*, vol. 46, no. 3, pp. 247–254, 2013.
- [16] F. Moradi, H. Mahmoodi, and A. Peiravi, "A High Speed and Leakage-Tolerant Domino Logic for High Fan-in Gates," in *Proceedings of the 15th ACM Great Lakes Symposium on VLSI*, ser. GLSVLSI '05. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2005, pp. 478–481.
- [17] A. Dadoria, K. Khare, T. Gupta, and R. Singh, "A Novel High-Performance Leakage-Tolerant, Wide Fan-In Domino Logic Circuit in Deep-Submicron Technology," *Circuits and Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 103–111, 2015.
- [18] P. Gronowski, *Design of High-Performance Microprocessor Circuits*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001, ch. Issues in dynamic logic design, Design of High-Performance Microprocessor Circuits, pp. 140–157.
- [19] S. Garg and T. K. Gupta, "Low power domino logic circuits in deep-submicron technology using CMOS," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 625–638, 2018.
- [20] M. H. Anis, M. W. Allam, and M. I. Elmasry, "Energy-efficient noise-tolerant dynamic styles for scaled-down CMOS and MTCMOS technologies," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 71–78, 2002.
- [21] Y. Lih, N. Tzartzanis, and W. W. Walker, "A Leakage Current Replica Keeper for Dynamic Circuits," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 1, pp. 48–55, 2007.
- [22] G. Palumbo, M. Pennisi, and M. Alioto, "A Simple Circuit Approach to Reduce Delay Variations in Domino Logic Gates," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 10, pp. 2292–2300, 2012.
- [23] M. Alioto, G. Palumbo, and M. Pennisi, "Understanding the Effect of Process Variations on the Delay of Static and Domino Logic," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 18, no. 5, pp. 697–710, 2010.
- [24] H. F. Dadgour and K. Banerjee, "A Novel Variation-Tolerant Keeper Architecture for High-Performance Low-Power Wide Fan-In Dynamic or Gates," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 18, no. 11, pp. 1567–1577, 2010.
- [25] B. Behin-Aein, J.-P. Wang, and R. Wiesendanger, "Computing with spins and magnets," *MRS Bulletin*, vol. 39, no. 8, pp. 696–702, 2014.
- [26] W. Zhao, E. Belhaire, C. Chappert, and P. Mazoyer, "Spin Transfer Torque (STT)-MRAM-Based Runtime Reconfiguration FPGA Circuit," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 9, no. 2, Oct. 2009.
- [27] R. Douglas, M. Mahowald, and C. Mead, "Neuromor-

- phic Analogue VLSI,” *Annual Review of Neuroscience*, vol. 18, no. 1, pp. 255–281, 1995, pMID: 7605063.
- [28] S. R. Nandakumar, S. R. Kulkarni, A. V. Babu, and B. Rajendran, “Building Brain-Inspired Computing Systems: Examining the Role of Nanoscale Devices,” *IEEE Nanotechnology Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 19–35, 2018.
 - [29] Z. Biolek, D. Biolek, and V. Biolkov, “SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift,” *Radioengineering*, vol. 18, no. 2, pp. 210–214, 2009.
 - [30] F. Argall, “Switching phenomena in titanium oxide thin films,” *Solid-State Electronics*, vol. 11, no. 5, pp. 535–541, 1968.
 - [31] J. J. Yang, M. D. Pickett, X. Li, D. A. A. Ohlberg, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices,” *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 7, pp. 429–433, 2008.
 - [32] M. D. Pickett, D. B. Strukov, J. L. Borghetti, J. J. Yang, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “Switching dynamics in titanium dioxide memristive devices,” *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 7, pp. 074 508–074 514, 2009.
 - [33] R. S. Williams, G. Medeiros Ribeiro, D. Borisovich Strukov, and J. Yang, “Controlled switching memristor,” U.S. patentus US20 120 313 070A1, 2012.
 - [34] M. Mahvash and A. C. Parker, “A memristor SPICE model for designing memristor circuits,” in *2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2010, pp. 989–992.
 - [35] J. G. Simmons, “Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulating Film,” *Journal of Applied Physics*, vol. 34, no. 6, pp. 1793–1803, 1963.
 - [36] D. B. Strukov, G. S. Snider, D. R. Stewart, and R. S. Williams, “The missing memristor found,” *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, 2008.
 - [37] T. A. Wey and S. Benderli, “Amplitude modulator circuit featuring TiO₂ memristor with linear dopant drift,” *Electronics Letters*, vol. 45, no. 22, pp. 1103–1104, 2009.
 - [38] Y. N. Joglekar and S. J. Wolf, “The elusive memristor: properties of basic electrical circuits,” *European Journal of Physics*, vol. 30, no. 4, pp. 661–683, 2009.
 - [39] S. Shin, K. Kim, and S.-M. Kang, “Compact Models for Memristors Based on Charge-Flux Constitutive Relationships,” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 29, no. 4, pp. 590–598, 05 2010.
 - [40] T. Fang, B. Amine, and G. Zhouye, “Low power dynamic logic circuit design using a pseudo dynamic buffer,” *Integration*, vol. 45, no. 4, pp. 395–404, 2012.
 - [41] V. Kursun and E. G. Friedman, “Domino logic with variable threshold voltage keeper,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 11, no. 6, pp. 1080–1093, 2003.

High-Performance 4×1 Multiplexer based on Single-Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor with CMOS-like Pass-Transistor Logic

Hamed Fooladvand * , Karim Abbasian , Hamed Baghban 

Department of Electrical & Computer Engineering, The School of Engineering Emerging Technologies at The University of Tabriz, East Azerbaijan, Iran

Abstract.- In the current research, the best property of Carbon Nanotube Field Effect Transistors (CNTFETs) exploited to propose a high performance 4-input 1-output (4×1) Multiplexer, using a CMOS-like Pass Transistor Logic (PTL) design style. To enhance a significant reduction in circuit complexity and a corresponding improvement in the performance envelope (power, area and speed) with respect to conventional CMOS equivalent circuit. The operating principles and experimental results for the PTL circuits using both p-FET and n-FET of CNTFETs presented. This property can be used in a multiplexer circuit, which transfers one of several input data to the output according to the control signal values. Results demonstrated that using of CNTFET can be achieved by constructing high performance carbon nanotube-based integrated circuits like logic Multiplexer based on a pass-transistor logic configuration. Further, this circuits can assembly with other circuits based on other Field effect transistors technology like GNR-FETs and improve ALU (Arithmetic Logic Unit) section of many processor ICs in high level of Nano-Scale VLSIs. The simulation results presented, and the power consumption compared with the conventional CMOS designs. The comparison of results approved that the CNTFET based design is capable of efficient power savings and high-speed performance.

Keywords: Carbon Nanotube Field Effect Transistor; Multiplexer; CMOS-like Pass Transistor Logic; Time Delay; PDP.

Multiplexor 4×1 de alto rendimiento basado en un transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono de pared simple con lógica de transistor de paso similar a CMOS

Resumen.- En los últimos años, según muchos estudios, el transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono (CNTFET) mostró un alto rendimiento en muchos circuitos lógicos debido a sus propiedades y en comparación con otros homólogos de silicio. Sin embargo, garantizar estos beneficios sigue siendo un desafío para la aplicación de circuitos integrados a nanoescala. Debido a sus excelentes características eléctricas y mecánicas, CNTFET es uno de los sustitutos más prometedores de la tecnología de transistores de efecto de campo semiconductores de óxido metálico (MOSFET). Aunque estas características son adecuadas para implementar en varios circuitos digitales prácticos, los circuitos basados en CNTFET resolverán enormes problemas de fabricación debido a su tamaño. En este artículo, mostramos que se podría obtener una simplificación importante mediante el diseño de circuitos integrados basados en CNTFET a través de una configuración lógica de transistor de paso tipo CMOS en el uso de transistores de efecto de campo, en lugar de la configuración tradicional de semiconductores de óxido de metal complementario (CMOS). La configuración PTL similar a CMOS crea una simplificación notable del diseño del circuito basado en CNTFET, una mayor velocidad del circuito y una gran reducción en el consumo de energía. Hay muchos problemas que se enfrentan al integrar un alto nivel de muchos transistores, como el efecto de canal corto, la disipación de potencia, el escalado de los transistores, etc. Para superar estos problemas, los Nanotubos de Carbono (CNT) tienen aplicaciones prometedoras en el campo de la electrónica. Los resultados de la simulación presentados y el consumo de energía en comparación con los diseños CMOS convencionales. La comparación de resultados probó que el diseño basado en CNTFET es capaz de ahorrar energía de manera eficiente y un rendimiento de alta velocidad.

Palabras clave: transistor de efecto de campo de nanotubos de carbono; multiplexor; lógica de transistor de paso tipo CMOS; retardo de tiempo; PDP.

Received: October 26, 2020.

Accepted: November 25, 2020.

* Correspondence author:

e-mail: h.fooladvand91@ms.tabrizu.ac.ir (H. Fooladvand)

1. Introduction

In the past several years, according to many studies Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) shown high performance in many logic circuits due to their properties and compared with other silicon counterparts. However, ensuring these benefits still are as a challenge for nanoscale integrated circuits application. Because of its superb electrical and mechanical features, CNTFET is one of the most promising substitutes of metal–oxide–semiconductor field-effect transistor (MOSFET) technology. Although these features are suitable for implementing in various practical digital circuits, CNTFET-based circuits will solve enormous fabrication problems due to their size. Here, we show that a major simplification could be obtained by CNTFET based integrated circuits designing based on a CMOS-like pass-transistor logic configuration in the use of field effect transistors, instead of traditional Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) configuration. The CMOS-like pass transistor logic configuration creates a notable simplification of the CNTFET based circuit design, a higher circuit speed and great reduction in energy consumption. There are many issues facing while high level integrating many numbers of transistors such as short channel effect, power dissipation, scaling of the transistors and etc. To overcome these problems considering Carbon Nanotube (CNT) have promising application in the field of electronics. Carbon Nanotube (CNT) is a pioneer of new materials technologies for electronic design because of its unique mechanical and electrical properties [1], [2]. CNTFET is the most promising technology to extend or complement traditional silicon technology due to three reasons: first, the operation principle and the device structure are similar to CMOS devices and it is possible to reuse the established CMOS design infrastructure. Second, it is also possible to reuse CMOS fabrication process. And the most important reason is that the CNTFET has the best experimentally demonstrated device current carrying ability to date. Semiconducting carbon nanotubes are considered to be promising channel

materials for the next generation of Nanoelectronic semiconductors, especially, for a high efficiency of Field Effect Transistors (FETs) [3], [4].

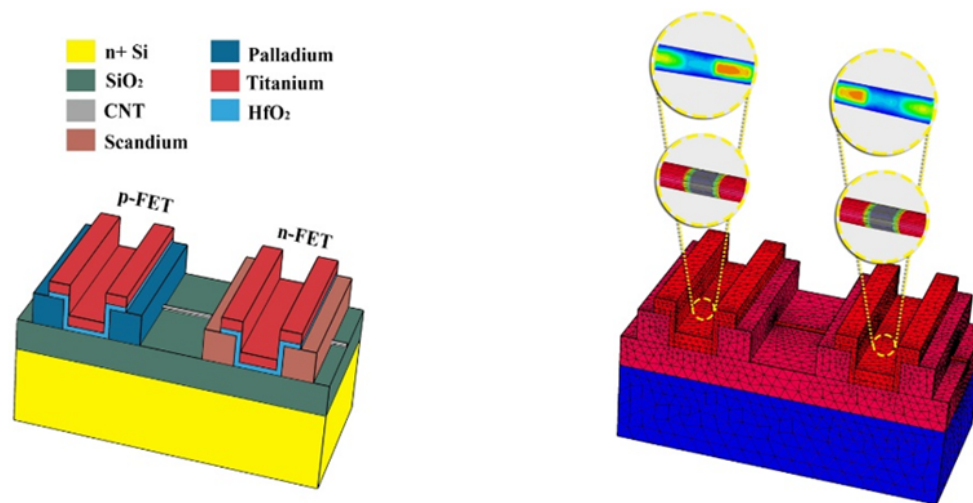
Also, Carbon Nanotubes (CNTs) and Graphene Nanoribbons have received significant attention from the academia as well the industry. Ideal electronic and structural properties of these materials make them suitable for electronic applications. These quests for knowledge are because of the fact that the improvement of the application and addition may lead to the improvement of other circuits parameters derived from them. Time Delay, power consumption and complexity are among instance of such parameters [5], [6]. Due to great extent of CNTFET in processors application, a Multiplexer based on SWCNT-FET is used in various applications wherein multiple data can be transmitted using a single line. In addition the Multiplexer could be vital of processors as evidenced by its wide use in Arithmetic Logic Unit (ALU) [7], [8].

2. Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) implementation plan

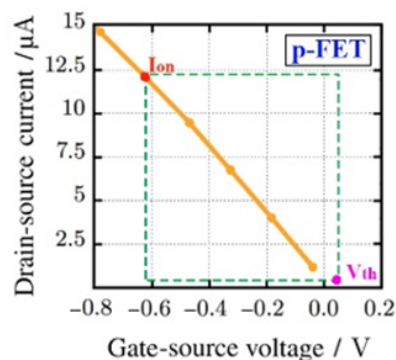
CNTFET model that developed by Stanford University used for many previous types of researches in this area. Stanford model implements a circuit-compatible model for Single Walled Carbon Nanotube Field Effect Transistor and is simulated in HSPICE [9], [10].

The p-FET and n-FET component used in this paper are shown in Figure 1. This model characterized in a process simulation framework by TCAD interactive tools and then by inspiration of Stanford CNTFET model with a little change, the circuit simulation of a 4×1 logic Multiplexer designed. Thus, this model implements a circuit-compatible model for SWCNT-FET due to real data for our simulations and is implemented in HSPICE.

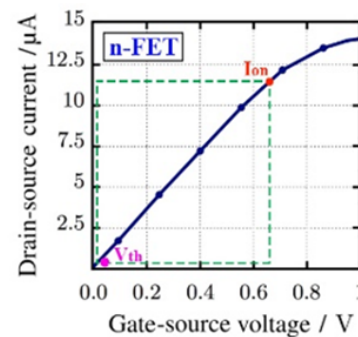
Each CNTFET employs one SWCNT below its gate. The carbon nanotube under the both gates is identical. The part of the SWCNT directly under the gates is intrinsic, on the other hand, threshold voltage and output conductance exceedingly depend on the channel doping rate, thus for the doped source and drain parts of



(a) Schematic diagram of a 3D view of SWCNT-based devices with a p-FET and n-FET pair (b) Physical mobility modeling to determine transport properties of the channel



(c) The transfer characteristics of the p-FET based on CNT (channel length $\approx 1\mu\text{m}$)



(d) The transfer characteristics of the n-FET based on CNT (channel length $\approx 1\mu\text{m}$)

Figure 1: Structure and characteristics of n-type and p-type CNTFETs

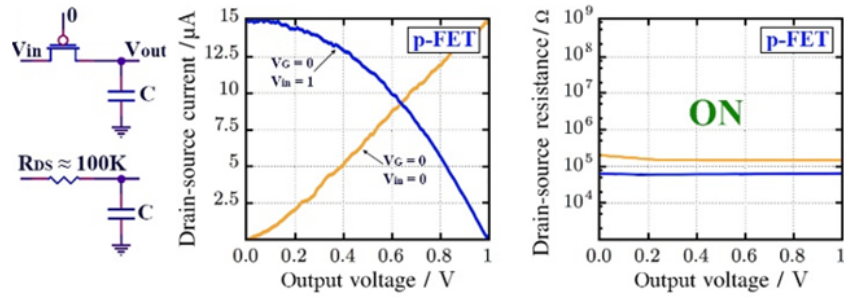
CNTFET, the doping level is taken as 0,85 % which is very higher than the first conduction band of the CNT. In this model, the screening effect of the charge in CNT under the gates can be ignored. Electron and hole mobility in CNT assumes equal. This design is simulated by 0,9 V operating voltage using HSPICE.

A schematic diagram showing a 3D view of SWCNT-based devices with a p-FET and n-FET pair is presented in Figure 1a. Physical mobility modeling with device simulation to determine transport properties of the channel shown in Figure 1b. The transfer characteristics of the p-FET and n-FET, based on the same CNT with a changeable diameter and a channel length of approximately $1\mu\text{m}$ are shown in Figure 1c and

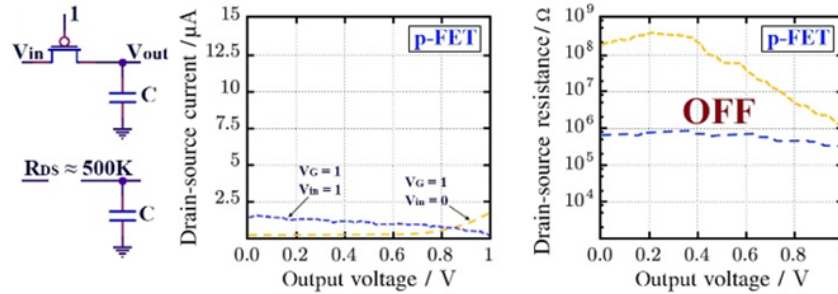
Figure 1d. For the p-FET, the source is biased at 1,0 V and drain is at 0 V, whereas for the n-FET, the source is biased at 0 V and the drain is at 1,0 V.

The green box defines the gate voltage window used to obtain I_{on} , where V_{th} is determined using the standard peak trans-conductance method. The extracted V_{th} (pink point) and I_{on} (red point) are (Figure 1c) 0,05 V and $11,6\mu\text{A}$ for the p-FET, and (Figure 1d) 0,03 V and $11,4\mu\text{A}$ for the n-FET. The output characteristic of the p-type (orange line) and n-type (blue line) CNTFETs with $|V_{gs}|$ varying from 0 to 1 V in steps of 0,2 V.

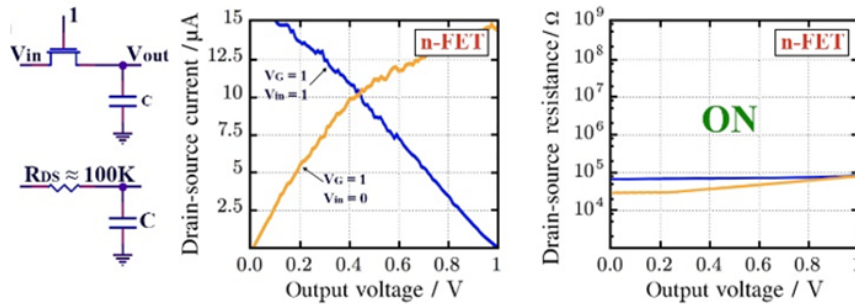
Figure 2 shows the operating principles for the Pass Transistor Logic (PTL) circuits using both p- and n-type of CNTFETs. As shown, when a low voltage (a logic 0, or 0 V) is applied to the gate for



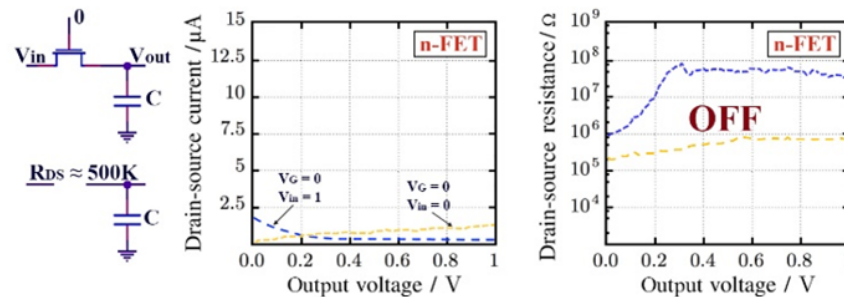
(a) The operating principles for p-type of CNTFET with PTL (a logic 0 is applied to the gate).



(b) The operating principles for p-type of CNTFET with PTL (a logic 1 is applied to the gate).



(c) The operating principles for n-type of CNTFET with PTL (a logic 1 is applied to the gate).



(d) The operating principles for n-type of CNTFET with PTL (a logic 0 is applied to the gate).

Figure 2: The operating principles of CNTFET-based PTL circuits

a p-FET pass transistor, Figure 2a, the resistance factor between the source (input) and drain (output) of the device, R_{ds} , is on the order of $100\text{ k}\Omega$ or less. Thus, the device is in its low-resistance or ON state,

and may pass the input signal V_{in} from the source to the drain. When a high bias (a logic 1, which is 1.0 V) is applied to the gate Figure 2b, R_{ds} is greater than $500\text{ k}\Omega$. The p-type device is thus in its high-

resistance or OFF state and may not pass the input signal V_{in} to the output faithfully. The operation of an n-type pass transistor is similar to that of a p-type pass transistor, but in a complementary way. The n-type pass transistor can pass an input signal when a logic 1 is biased on the gate Figure 2c, and it is turned off when a logic 0 is biased on the gate Figure 2d. It should be noted that pass transistors are used here as switches to pass logic levels between the nodes of a circuit, rather than as switches connected directly to the power supply.

Pass transistor logic circuits based on CNTFET is a popular and widely used alternative to the conventional CMOS logic configuration, which can significantly reduce the number of transistors required to implement a logic circuit and has the additional advantage of lower capacitance [11], [12].

The main advantage of using PTL is that one Pass transistor (either a p-FET or an n-FET) is adequate to demonstrate a logical operation, which significantly reduces the number of transistors used than a circuit using a conventional CMOS configuration to achieve the same performance [13], [14]. One major drawback in the Silicon based PTL is that albeit an n-type pass transistor may produce a strong zero or ground, it produces only a weak logic one due to lowering the output below $V_{DD}-V_{thn}$, where V_{thn} is the threshold voltage of the n-FET. On the other hand, a p-FET pass transistor produces a strong logic one, but a weak logic zero by raising the output above $|V_{thp}|$ when the input is zero, where V_{thp} is the threshold voltage of the p-FET. This weak results from different threshold voltages for n-FET and p-FET, and the change in the output characteristics is usually known to as threshold voltage drop [15], [16]. One possible solution way to this deficiency is to regulate the threshold voltages of both the n-FET and p-FET, so that $V_{thn} \approx V_{thp} \approx 0$ at the processing operation via doping. However, this is usually not acceptable in conventional silicon CMOS technology, but, the threshold voltage is readily adjustable in doping-free CNT CMOS-like technology [17]. Supplementary Figure 1 demonstrates that it is possible to change the threshold voltage of both n-FET and p-FET to the

middle of them at approximately 0V by selecting a suitable gate metal, which greatly reduces the conventional threshold voltage in CNTFET-based PTL circuits. However, limited threshold voltage drops for both the n-type and p-type CNTFETs as pass transistors still prepared, as shown in Figure 2. For a p-FET Figure 2a, the output resistance for passing a logic 0 in its ON state (the solid orange line) is obviously larger than that for passing a logic 1 as the solid blue line. Thus, there still provides a small threshold voltage drop for the p-type CNTFET when a logic 0 is passed, and the voltage drop is significantly lower when passing a logic 1. In like manner, an n-type CNTFET passes a logic 0 well, while passing a logic 1 with a larger R_{ds} , threshold drop at low bias Figure 2c.

However, advantaging from the small threshold voltage near zero, the threshold voltage drops for both n-type and p-type CNT pass transistors are much smaller than their conventional silicon counterparts, which show threshold voltages that are typically ten times larger [18], [19]. Fundamentally, these high-performance CNT pass transistors, many types of high-performance logic Integrated Circuits can be designed with a Pass Transistor Logic configuration [20], [21].

3. Multiplexer circuit implementation plan

Multiplexers are a common building block for data-paths and data-switching structures, and are used extensively in a number of applications including processors, processor buses, and network switches. The optimization of Multiplexer is at the heart of digital architecture performance tuning in terms of power, area and speed [22]. In the previous studies, various approaches have been proposed to reduce power consumption and the area in multiplexer section, the algorithm level and at the circuit level by defining the appropriate logic styles to match the application type. The use of CNTFET technology proved can be a promising alternative direction for this issue since such approaches have previously resulted in highly efficient solutions in term of power consumption, area and delay when used for standard or reconfigurable cells.

Here, we exploit the best property of CNTFETs to propose a high performance 4-input 1-output (4×1) Multiplexer, using a CMOS-like Pass Transistor Logic (PTL) design style, demonstrating a significant reduction in circuit complexity and a corresponding improvement in the performance envelope (power, area and speed) with respect to conventional CMOS equivalent circuit.

The operating principles and experimental results for the PTL circuits using both p-FET and n-FET of CNTFETs discussed in Figure 2, this property can be used in a Multiplexer circuit, which transfers one of several input data to the output according to the control signal values. This is shown in Figure 3 for an example Multiplexer with four data inputs A, B, C, D and two select inputs, S_1 and S_0 , with the truth table.

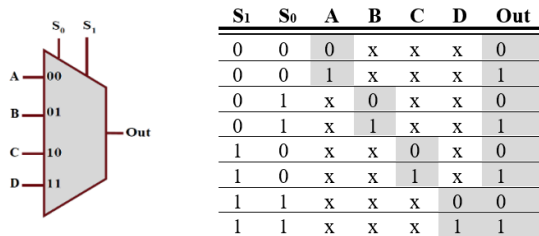


Figure 3: Truth table and graph for an ideal 4×1 Multiplexer

A sum of products implementation of the Multiplexer can be written like equation (1):

$$Out = A \cdot \bar{S}_0 \cdot \bar{S}_1 + B \cdot S_0 \cdot \bar{S}_1 + C \cdot \bar{S}_0 \cdot S_1 + D \cdot S_0 \cdot S_1 \quad (1)$$

As shown in Figure 4, at a transistor level, this expression can be implemented with just six SWCNT-FET devices by CMOS-like pass transistor logic.

4. Performance evaluation

4.1. Simulation results

The input-output waveforms for proposed Multiplexer are shown in Figure 5. For example, when S_1 and S_0 have 1 and 0 logic value respectively, Multiplexer should show C logic value on output. This state can be investigated for other logic values

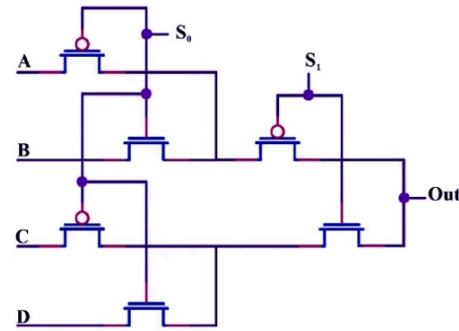


Figure 4: 4×1 Multiplexer based on CNTFET with CMOS-like PTL

due to Figure 5. Thus, our simulation results approved truth table near an ideal Multiplexer that shown in Figure 5. Meanwhile, Figure 6 shows a rising signal edge for output signal waveform of the multiplexer with more resolution in a very smaller time window that shows a high performance for CNTFET-based Multiplexer circuit design.

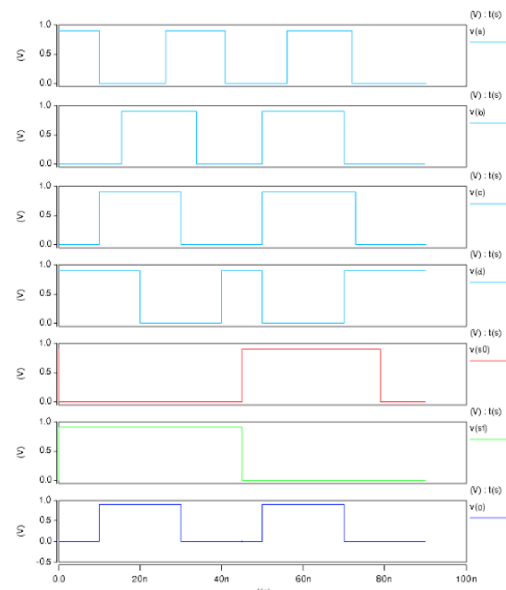


Figure 5: Input - output signal waveforms for 4×1 Multiplexer

Generally, according Figure 5 graph V(a) is selected as V(o) when $V(s_1)=0$ and $V(s_0)=0$, whereas V(b) is selected when $V(s_1)=1$ and $V(s_0)=0$, V(c) is selected when $V(s_1)=0$ and $V(s_0)=1$, also V(d) is selected when $V(s_1)=1$ and $V(s_0)=1$.

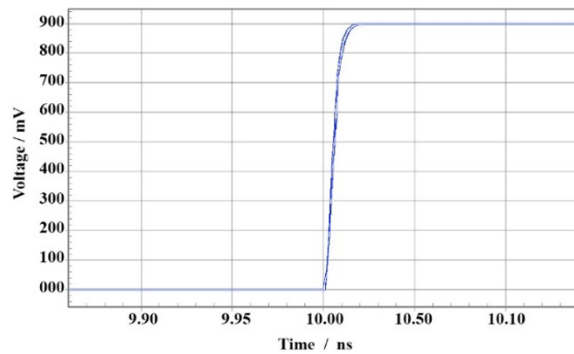


Figure 6: A rising signal edge of Multiplexer output waveform

4.2. Time Delay, Power consumption and PDP

Simulation results about time delay behavior of the CNTFET-based Multiplexer are shown in Table 1. The Power consumption of the CNTFETs with Power Delay Product (PDP) and PDP discrepancies values together are shown in Table 2.

Where SD is standard deviation of CNT diameter, Td is time delay and ΔT_d is propagation delay variation for presented circuit design.

Figure 7 shows simulation results of the Multiplexers according to diameter variation versus Time behavior. In this type of simulation, carbon nanotube diameter is swept from 0,60 nm to 2,20 nm and the various time delay criteria are estimated. Two important subjects can be obtained from Figure 8. The first subject is that dispersion in time delay, rise time and fall time all increase aggressively as CNT diameter is decreased to lower than 0,80 nm. Furthermore, when CNT diameter increases more than 0,80 nm point, the time delay is permanently decreased.

This means when carbon nanotube diameter increases, energy band gap is decreased as a result authorizing more charge carriers to participate in current transferring and increasing conduction, increasing the current through the CNT means that delay is permanently reduced till entering the balanced state at diameters larger than 1,5 nm while supply voltage fixed on 0,90 V. The second subject is about fall time and rise time that they are very similar and this issue approve that due the equal mobility of electrons and holes in CNT, utilizing

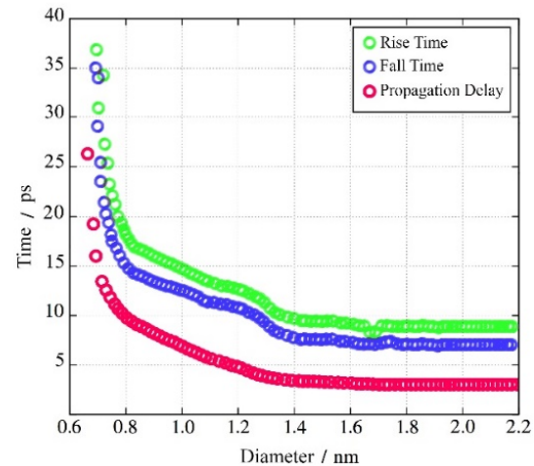


Figure 7: Multiplexer Timing Behavior according to CNT Diameter change

structure with CNTFETs for a Multiplexer with Pass Transistor Logic would yield to similar rise time and fall time and uniform waveform.

Where SD is Standard Deviation of CNT diameter, Mean P is Mean Power consumption, ΔP is propagation Power consumption differences, PDP is Power Delay Product and ΔPDP is PDP discrepancies for presented circuit.

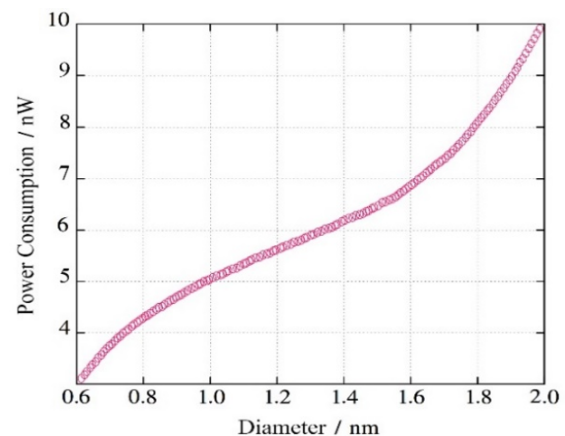


Figure 8: Power Consumption versus various diameter for 4×1 Multiplexer

The quantitative simulation results of 4×1 Multiplexers shown in Figure 8. CNT diameter is swept from a minimum value to a maximum value (0,60 nm to 2,00 nm). As shown where carbon nanotube diameter increases, power consumption is increased, that is because of the energy band gap decreasing in CNT. When CNT diameter

Table 1: Time Delays for 4×1 Multiplexer

Diameter (nm)	SD (nm)	Mean Td (ps)	Min, Td (ps)	Max, Td (ps)	ΔTd (ps)
0,80	0,04	11,86	13,80	27,01	13,21
	0,09	13,77	17,04	34,56	17,52
	0,18	17,06	12,09	111,03	98,94
1,10	0,04	7,38	14,05	77,94	63,89
	0,09	7,51	9,11	20,45	11,34
	0,18	8,62	10,07	67,14	57,07
1,30	0,04	8,22	7,04	134,82	127,78
	0,09	7,86	6,08	55,90	49,82
	0,18	7,42	6,45	89,24	82,79
1,50	0,04	5,45	6,35	12,45	6,10
	0,09	4,83	6,20	32,43	26,23
	0,18	4,62	6,15	13,07	6,92
1,70	0,04	3,55	6,32	9,96	3,64
	0,09	4,01	6,36	9,45	3,09
	0,18	4,22	6,31	33,60	27,29
1,90	0,04	4,07	5,80	7,89	2,09
	0,09	3,65	5,76	8,10	2,34
	0,18	3,91	5,99	8,61	2,62
2,01	0,04	3,87	5,78	8,76	2,98
	0,09	4,08	5,69	15,08	9,39
	0,18	3,59	5,83	16,78	10,95

Table 2: 4 × 1 Multiplexer Power Consumption and PDP discrepancies

Diameter (nm)	SD (nm)	Mean P (nW)	ΔP (nW)	MeanPDP (×10 ⁻²⁰ J)	ΔPDP (×10 ⁻²⁰ J)
0,80	0,04	4,19	1,02	99,51	23,96
	0,09	4,27	1,47	104,04	121,05
	0,18	4,33	1,29	121,05	178,23
1,10	0,04	4,50	2,12	78,36	14,56
	0,09	4,84	1,76	81,25	131,91
	0,18	4,85	1,59	87,43	225,59
1,30	0,04	5,25	3,03	68,61	176,90
	0,09	5,21	2,58	73,11	15,95
	0,18	5,32	1,94	77,84	5,69
1,50	0,04	5,55	0,86	58,76	73,67
	0,09	5,67	1,47	62,52	13,45
	0,18	5,71	4,01	66,02	65,97
1,70	0,04	5,99	2,39	53,01	87,41
	0,09	6,11	2,70	55,88	11,23
	0,18	6,22	1,83	56,87	47,91
1,90	0,04	6,44	0,99	49,45	34,94
	0,09	6,67	1,79	51,63	43,26
	0,18	6,88	3,44	53,69	23,33
2,01	0,04	7,01	3,48	44,01	26,67
	0,09	7,42	3,21	46,79	4,79
	0,18	7,53	2,86	48,11	11,45

increases, its band gap is reduced, thus charge carriers need lower energy to flow and producing a greater current. This operation increased current successively and causes power consumption to increase. The graph shows a snap rise for power

consumption where CNT diameter is increased above 1,5 nm.

Monte Carlo simulation results of 9500 Multiplexers shown in Figure 9. It illustrates the Multiplexers uncertain cases of Time delay

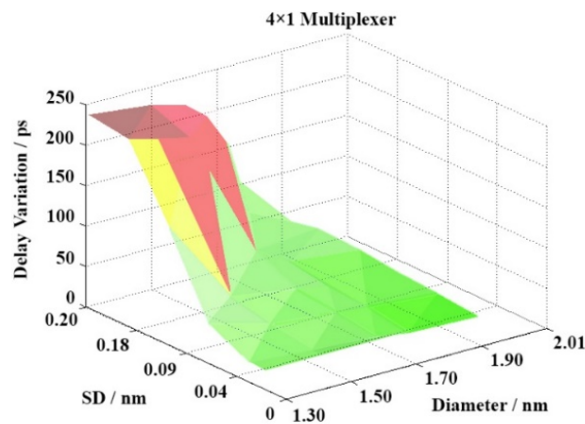


Figure 9: Multiplexer Delay time according to CNT diameter & SD variation

propagation, it is drawn up according to differences in maximum and minimum rise time and fall time, carbon nanotube average diameter and standard deviation. The instability in delay for Multiplexer is critical when the small mean CNT diameter is blended with larger SDs of CNT diameter.

5. Discussion

It is well known that a good circuit configuration at the architectural level should take full advantage of the component device properties at the physical level. Here, we summarized the advantages of a 4×1 Multiplexer based on Single Wall Carbon Nanotube Field Effect Transistor with Pass Transistor Logic. Our design compared with other methods that presented in [23], [24] first, the number of transistors can be significantly reduced if a circuit with an optimal function is designed with a Pass Transistor Logic configuration when compared with that using the usual CMOS or other configurations as shown in Figure 10. Reducing the number of transistors in an IC not only leads to higher efficiency per transistor, but also to higher speed and lower static power dissipation overall. Second, the major drawback of conventional circuit threshold voltage drop is largely avoided in CNTFET-PTL circuit, because of the readily adjustable threshold voltage of the CNTFET.

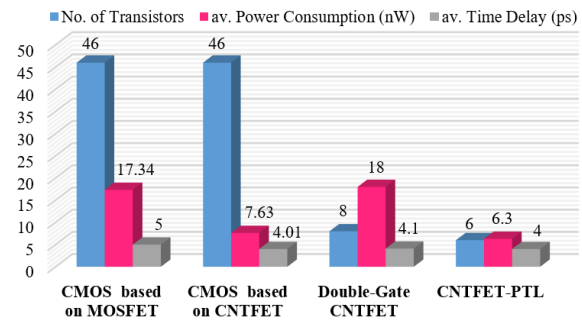


Figure 10: Comparison of average performance metrics for various 4×1 MUX

6. Conclusion

Using CNTFET can be achieved by constructing high-performance carbon nanotube-based integrated circuits like logic Multiplexer based on a pass-transistor logic configuration, which this circuits can assembly with other circuits based on other Field effect transistors technology like GNR-FETs and improve ALU (Arithmetic Logic Unit) section of many processor ICs in high level of Nano-Scale VLSIs.

The comparison of results indicated that the CNTFET based design is capable of efficient power savings. The 4×1 Multiplexer is designed using CNTFET with the different CNT diameters and the performance of the proposed designs are evaluated in various simulation conditions.

7. References

- [1] K. Young Bok, K. Yong-Bin, and K. Lombardi, "A novel design methodology to optimize the speed and power of the CNTFET circuits," in *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2009, pp. 1130–1133.
- [2] K. Yong-Bin, "Integrated circuit design using carbon nanotube field effect transistor," *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, vol. 12, no. 5, pp. 175–188, 2011.
- [3] L. Sheng, K. Yong-Bin, and F. Lombardi, "A novel CNTFET-based ternary logic gate design," in *2009 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2009, pp. 435–438.
- [4] C. Geunho, K. Yong-Bin, F. Lombardi, and M. Choi, "Performance evaluation of CNFET-based logic gates," in *2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2009, pp. 909–912.

- [5] B. Jingwei and Y. Huang, "Fabrication and electrical properties of graphene nanoribbons," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 70, no. 3–6, pp. 341–353, 2010.
- [6] M. Montazeri-Gh and M. Mahmoodi-K, "Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition," *Journal of cleaner production*, vol. 139, pp. 935–948, 2016.
- [7] S. L. Murotiya and A. Gupta, "Design of CNTFET-based 2-bit ternary ALU for nanoelectronics," *International Journal of Electronics*, vol. 101, no. 9, pp. 1244–1257, 2014.
- [8] A. Sharma and T. Ravi, "Low power 8-bit ALU design using full adder and multiplexer," in *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, pp. 2160–2164.
- [9] J. Deng and H. S. P. Wong, "A compact SPICE model for carbon-nanotube field-effect transistors including nonidealities and its application—Part I: Model of the intrinsic channel region," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3186–3194, 2007.
- [10] L. Ding, Z. Zhiyong, P. Tian, L. Shibo, W. Sheng, Z. Weiwei, L. Jie, and P. Lian-Mao, "Carbon nanotube field-effect transistors for use as pass transistors in integrated logic gates and full subtractor circuits," *ACS Nano*, vol. 6, no. 5, pp. 4013–4019, 2012.
- [11] L. Ding, Z. Zhiyong, L. Shibo, P. Tian, W. Sheng, L. Yan, Z. Weiwei, L. Jie, and P. Lian-Mao, "CMOS-based carbon nanotube pass-transistor logic integrated circuits," *Nature Communications*, vol. 3, p. 677, 2012.
- [12] T. Pei, P. Zhang, Z. Zhang, C. Qiu, S. Liang, Y. Yang, S. Wang, and L. M. Peng, "Modularized construction of general integrated circuits on individual carbon nanotubes," *Nano Letters*, vol. 14, no. 6, pp. 3102–3109, 2014.
- [13] R. Zimmermann and W. Fichtner, "Low-power logic styles: CMOS versus pass-transistor logic," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 7, pp. 1079–1090, 1997.
- [14] J. M. Rabaey, A. P. Chandrakasan, and B. Nikolić, *Digital integrated circuits: a design perspective*. Pearson Education, 2003, vol. 7.
- [15] N. H. E. Weste and D. M. Harris, *CMOS VLSI Design: A Circuits and System Perspective*, 4th ed., M. Hirsch, Ed. Addyson-Wesley, 2005.
- [16] Z. Zhang, S. Wang, L. Ding, X. Liang, T. Pei, J. Shen, H. Xu, Q. Chen, R. Cui, Y. Li, and L. M. Peng, "Self-aligned ballistic n-type single-walled carbon nanotube field-effect transistors with adjustable threshold voltage," *Nano Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 3696–3701, 2008.
- [17] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3rd ed. John Wiley & sons, 2006.
- [18] A. Chen, J. Hutchby, V. Zhirnov, and G. Bourianoff, *Emerging nanoelectronic devices*. John Wiley & Sons, 2014.
- [19] Y. S. Mehrabani, F. M. Reza, and E. Mohammad, "A novel low-energy CNFET-based full adder cell using pass-transistor logic," *International Journal of High Performance Systems Architecture*, vol. 5, no. 4, pp. 193–201, 2015.
- [20] M. Grailoo, M. Hashemi, K. Haghshenas, S. Rezaee, S. Rapolu, and T. Nikoubin, "CNTFET full-adders for energy-efficient arithmetic applications," in *2015 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2015, pp. 1–6.
- [21] P. Metzgen, "A high performance 32-bit ALU for programmable logic," in *FPGA '04: Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays*, 2004, pp. 61–70.
- [22] K. Jabeur, I. O'Connor, N. Yakymets, and S. Le Beux, "High performance 4:1 multiplexer with ambipolar double-gate FETs," in *2011 18th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems*, 2011, pp. 677–680.
- [23] P. Sadeghpour and H. Mirzaei, "A 180 nm CMOS Low Noise Amplifier with Increased linearity using Current-Reuse Technique for Broadband Applications," *Journal of Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 21–27, 2019.
- [24] G. L. Madhumati, M. Madhavalatha, and K. Ramakoteswara Rao, "Power and delay analysis of a 2-to-1 multiplexer implemented in multiple logic styles for multiplexer-based decoder in Flash ADC," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 29–31, 2009.

Determination of the characteristics of the wheat straw bale, as an agro-industrial waste for use as a construction material

Paulina Viera ^{*,a} , Darío Aguirre ^a , José María Monzó ^b 

^a*Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática. Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.*

^b*Instituto Universitario de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València, Valencia, España.*

Abstract.- The objective of this research is to determine the physical-mechanical characteristics of the straw bales produced in Ecuador, in order to define their possible use in the construction of earthquake-resistant housing. For this purpose, experimental methods proposed by Vardy (2006) were used on the bales varying their position for flat and edge load tests. Thus obtaining the modulus of elasticity of the bundle bare and plastered on their faces, with a mortar based on lime cement and natural fibers previously designed. It was determined that the maximum modulus of elasticity of the plastered bundle varies between 12,98 and 18,67 MPa. These values were used to perform the structural modeling of a typical house through the use of a software to propose a housing solution that promotes the use of the straw bale produced in Ecuador for the construction of earthquake-resistant housing. From the analysis of this model, it is concluded that the maximum inelastic drifts of the proposed structure, with supporting masonry made with the straw bales, are less than 2 %, with a rendering of thickness between 2 and 4 cm, concluding that the structural responses obtained comply with what is established for seismic-resistant housing in the Ecuadorian Construction Standard.

Keywords: modulus of elasticity; straw bale; housing; sustainability.

Determinación de las características del fardo de paja de trigo, como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción

Resumen.- El objetivo de esta investigación es determinar las características físico-mecánicas de los fardos de paja producidos en Ecuador, para definir su posible uso en la construcción de viviendas sismorresistentes. Para lo cual, se utilizaron métodos experimentales propuestos por Vardy (2006) en los fardos, variando su posición para pruebas de carga en plano y canto. Obteniendo así el módulo de elasticidad del fardo desnudo y revocado en sus caras, con un mortero en base de cal, cemento y fibras naturales previamente diseñado. Se determinó que el máximo módulo de elasticidad del fardo revocado varía entre 12,98 y 18,67 MPa. Estos valores fueron utilizados para realizar el modelamiento estructural de una vivienda tipo, mediante el uso de un software, para proponer una solución habitacional que fomente el uso del fardo de paja producido en Ecuador para la construcción de viviendas sismorresistentes. Del análisis de este modelo se concluye que las derivas inelásticas máximas de la estructura propuesta, con mampostería portante realizada con los fardos de paja, son menores al 2 %, con un revoco de espesor de entre 3 y 4 cm, concluyendo que las respuestas estructurales obtenidas cumplen con lo establecido para viviendas sismorresistentes en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Palabras clave: módulo de elasticidad; fardo de paja; vivienda; sustentabilidad.

Recibido: 26 de septiembre, 2020.

Aceptado: 28 de noviembre, 2020.

1. Introducción

En Ecuador, según datos oficiales INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos) [1] y RIMISP (Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural) [2], la tasa de pobreza extrema multidimensional a nivel rural creció de 39,9 % a 42 % en el año 2019. La falta de

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lviera@uce.edu.ec (P. Viera)

recursos económicos, se refleja también en el déficit cualitativo de vivienda para esta misma zona a nivel nacional de 95,3 % según datos del último censo INEC [3].

Una de las principales fuentes de sustento económico de la población rural es la actividad agrícola. La cosecha y siembra de diversos productos representa una de la amplia gama de actividades relacionadas con la explotación de recursos naturales, la cosecha y siembra de trigo es una de ellas, sobre todo en la región rural de la Sierra. De acuerdo al MAGAP (Ministerio de Agricultura y Ganadería) [4], las provincias de producción triguera son Pichincha, Imbabura, Chimborazo, Bolívar, Carchi. Siendo Pichincha la que más producción aporta con un 27 %, le sigue Imbabura con 26 %, para un total de superficie sembrada y cosechada de trigo de aproximadamente 9.140 y 8.980 hectáreas respectivamente. Cabezas [5] cita un rendimiento de producción de trigo en el país de 2,5 toneladas por año. Sin embargo, en la zona rural de estas provincias se registra un déficit cualitativo de vivienda de 6,6 %; 2,4 %; 3,2 %; 1,7 % y 1,3 % respectivamente [6].

Dentro de la producción de trigo, la paja es un desecho que se empaca en forma de fardos prismáticos y constituye aproximadamente la mitad de la vegetación que se puede cosechar de un cultivo además de ser reutilizable, término referido al hecho que normalmente este desecho es empleado para el alimento del ganado. También se usa para cubrir suelos en contra de heladas, para oxigenar los suelos de cultivos, abono o simplemente como piso para establos. De acuerdo con varios autores, Martínez [7] y [8], en el mundo se registran más de 600 millones de hectáreas de cereal, por cada tonelada que se cosecha para el consumo, se generan 1,5 toneladas de paja como un residuo o desecho agrícola y de aquello el 90 % se quema. Ponce [9] afirma que en Chile se queman mas de 4 toneladas de paja, material que de ser utilizado se aprovecharía para construir 100 viviendas. Por consiguiente el porcentaje que se desperdicia de este material es significativo y puede aprovecharse haciéndose un enfoque en la bioconstrucción con paja mediante

una caracterización del material.

La paja es un desecho agroindustrial que está constituida por el tallo seco de los cereales y plantas fibrosas, específicamente entre la raíz y la espiga, conociendo que existen pajas de trigo, escanda, centeno y arroz [7]. Minke [10] afirma que la paja es un material sostenible debido a los beneficios que ofrece no solo en el ámbito de la agricultura (necesidad de reducción de CO₂) sino también en que es un material que no emite CO₂ u otros gases que pudieran afectar y generar un impacto ambiental negativo. Según Bernal [11], 10 kilogramos de paja de trigo absorben 14 kilogramos de dióxido de carbono, los cuales retienen durante el plazo de su vida.

Es necesario acotar que el impulso de utilizar este material sobre todo en las zonas rurales del país recae también en el hecho de que al ser un material amigable con el ambiente y que a su vez se complementa con materiales propios de la zona, el emplazamiento de viviendas unifamiliares aprovechando el porcentaje de fardos de paja que se quema, representa una opción viable de vivienda digna, accesible económicamente y de fácil construcción para la sociedad que vive en dichas zonas. Pachala [12] realiza una comparación de presupuesto referencial para tres tipos de viviendas ubicadas en la provincia de Bolívar-Guaranda: Casa unifamiliar con muros de paja portantes, con estructura metálica y mampostería de bloque, y con estructura de hormigón y mampostería de bloques, obteniendo \$10.066,18 \$17.856,25 y \$20.456,38 respectivamente, en donde se evidencia la diferencia económica notable del uso del fardo de paja con respecto a los materiales de construcción generalmente utilizados.

Con el aprovechamiento de este desecho; la actividad agrícola puede ser redireccionada a una gestión sostenible en el ámbito de la construcción [13]. El fardo de paja en conjunto con otros materiales comúnmente empleados en la edificación de viviendas, tales como madera, barro, arcilla cal y cemento, garantizan la posibilidad de levantar estructuras sostenibles con el medio ambiente, por tal motivo, el compósito empleado que conforma la cara del fardo, es un revestimiento con menor coste energético y

suficientes propiedades resistentes para ser usado en la construcción, la investigación incorpora cal hidráulica para disminuir la cantidad de cemento en la fase matriz, y en la fase dispersa, usa fibras naturales extraídas de la planta de yute (*corchorus capsularis*) [14]. Su diseño además tiene como beneficio la reducción del impacto ambiental negativo, fomentando el uso de materiales alternativos, ecológicos y sustentables cuya fabricación reduzca la energía que se ocupa durante su elaboración, y que, en conjunto con los fardos de paja garantizan una obra ecológica.

Con los fardos de paja, se asegura la inclusión de una alternativa con bioconstrucción sostenible, de hecho, las construcciones más antiguas registradas y que actualmente siguen en pie datan entre 1900 y 1914 [15], en Europa tenemos “La Maison Feuillate” construida en 1921 y que actualmente se usa como sede del Centro Nacional para la Construcción con Paja de Francia [10], poco después de 1993 en Holanda se presentó el auditorio para la feria internacional de horticultura y jardinería “Floriade 2002”, considerado el edificio público más grande de Europa construido con fardos de paja. Martínez [7], plantea que gracias a estas obras, las construcciones con paja se han extendido por todo el mundo; EE.UU., Francia, Canadá, Inglaterra, Austria, Dinamarca, Australia; de manera que en la actualidad la construcción con este material esta presente en casi todos los continentes: África, Sudamérica, Norteamérica, Europa, Asia, entre otros.

La importancia de este estudio radica en que aporta datos, que antes de esta investigación no existían, acerca de las características físicas y mecánicas de los fardos producidos en el Ecuador para posibilitar a los profesionales de la construcción, el modelamiento estructural de edificaciones a ser construidas con este material. Esta caracterización se realizó mediante ensayos de laboratorio en base a normativa nacional e internacional (INEN-ASTM), estudiando al material con y sin revoco de acuerdo a la metodología aplicada por varios autores, Garas [16], Maraldi [17], Romans [18]; [19] y Rodríguez [20], especialmente Vardy [21]. El uso de mortero como recubrimiento de la mampostería portante

realizada con fardos, permite que el conjunto fardo-revoco funcione como una estructura del tipo sándwich donde la piel es el elemento mortero, y el núcleo es el fardo de paja, cuyo principio se basa en que los revestimientos absorben parte de los esfuerzos y cargas además proporcionan rigidez al conjunto.

Esta investigación, por tanto, representa además una alternativa al desarrollo rural del Ecuador en la construcción de vivienda. Por tal razón, y acompañado de las crecientes soluciones sostenibles a nivel mundial, se espera que los resultados obtenidos sirvan como punto de partida para otros estudios que permitan el desarrollo e implementación de una normativa constructiva técnica nacional respecto del uso de fardos de paja en la construcción. Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad, esfuerzos a compresión, densidades y contenidos de humedad son un aporte para la tecnificación de la construcción con fardos de paja producidos en el Ecuador y posibilita el modelamiento estructural. Como ejemplo se presenta una vivienda tipo de 120,35 m², en donde se comprueba que las respuestas estructurales (derivadas de piso) cumplen con los requisitos estipulados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción [22], por lo tanto, el fardo de paja, es apto para su uso en la construcción.

2. Metodología

2.1. Recolección, procesamiento y análisis de datos

Esta investigación es experimental y se basa en procedimientos establecidos en la normativa nacional ecuatoriana INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y normativas internacionales ASTM (American Society of Testing Materials) esencialmente para la elaboración y diseño de las mezclas, elaboración de especímenes de prueba, aproximación de metodología basada en investigaciones internacionales como el de Vardy [21] para la obtención del módulo de elasticidad de los fardos de paja.

2.2. Materiales

Los materiales que conforman el mortero se pueden visualizar en la Tabla 1.

Tabla 1: Materiales del mortero

Material	Especificación
Cemento Hidráulico tipo GU-HOLCIM	NTE INEN 2380 [23](ASTM C 1157) [24]
Cal hidráulica T-30 (NHL)	NTE INEN 247 (ASTM C207) [25, 26]
Arena gradada	Cantera Fucusucu III-San Antonio-Quito.
Fibras naturales-yute (<i>corchorus capsularis</i>)	Longitudes nominales de 2,5 a 5 cm
Agua	Red-Distrito Metropolitano de Quito



Figura 1: Enfardadora

2.3. Mortero

En la presente investigación se utilizó un revoco con características estructurales [21] que incorpora fibras en su dosificación, cuyo mortero de resistencia de 14,10 MPa cumple con la resistencia mínima de 6,89 MPa establecida por RB473 [27] para morteros cal-cemento aplicados en la construcción con fardos, valores que se puede observar en la Tabla 2, en concordancia además con Avon [28] y Solé [29], en donde se construyen muros con fardos de paja y se establece una resistencia mínima de 8 MPa para que el mortero sea suficientemente resistente. El diseño de este mortero se estableció en función de la Norma ASTM 305-14 y ASTM C192-16, así como la realización de ensayos de pruebas de carga para esfuerzo a compresión, módulo estático de elasticidad y coeficiente de Poisson, las condiciones de ensayo para Elasticidad y Poisson fueron lecturas cada 2,5 kN, gradiente de aplicación de carga 0,03 MPa/s, finalización de carga a 15 % de la rotura y una velocidad mínima de 0,10 s⁻¹.

2.4. Fardos de paja

2.4.1. Provisión de fardos

Los fardos de paja para el estudio fueron obtenidos directamente desde la parroquia rural Calacali (Figura 1), donados por el Ing. Jorge Dávila.

El trigo es un producto propio de dicha zona, en el cantón de Pichincha, específicamente Calacali existe área de producción de trigo de paja de 605 hectáreas [39]. Los fardos fueron trasladados hacia la Universidad Central del Ecuador para

su almacenamiento adecuado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos ubicándolos y apilándolos cuidadosamente sobre tabiques de madera evitando el contacto directo con el suelo y protegiéndolos de la humedad.

2.4.2. Almacenamiento

Los fardos son almacenados encima de pallets de madera (Figura 2) evitando el acercamiento directo con el suelo para evitar el contacto con residuos y principalmente la humedad, los mismos deben ser cubiertos en su totalidad y así evitar el deterioro debido al contacto de agua, lo que genera por consiguiente su pudrición e inhabilita su uso.



Figura 2: Fardos almacenados en laboratorio

Maraldi y colaboradores en [40] y [41] coinciden en que, para revocar al fardo, ya sea con un mortero hecho con cal o con yeso, es necesario pulirlo, de tal forma que los restos de la paja que sobresalen de cada una de las caras puedan definirse en una longitud aproximada, de esta manera se garantizó un recubrimiento adecuado con un espesor definido en toda el área de la cara del fardo.

Tabla 2: Esfuerzo a compresión, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson

Id.	Dosificación	Esfuerzo a compresión axial (MPa)			Módulo estático de elasticidad (MPa)	Coef. de Poisson
		7 días	14 días	28 días		
M4	0.75C 0.25 cal 3A 1 %FY 20 %H ₂ O	7,45	8,43	14,1	28	28
					24859,08	0,21
Normativa	ASTM C 305, NTE 3124 [30](ASTM C 192 [31]) y NTE INEN 2518 [32] (ASTM C 270 [33])	NTE INEN 1573:2010 [34] (ASTM C 31 [35]), ASTM C 496-17 [36], NTE INEN 3124 (ASTM C 192M-18 [31] y ASTM C 511 [37])			ASTM C 469 [38]	

2.4.3. Densidad y Contenido de humedad

Para la caracterización del fardo desnudo (no revocado), es necesario determinar su contenido de humedad y densidad aparente, de manera que cumplan con los requisitos previo a su uso, por tal motivo se realizó la medición de las dimensiones de los fardos de paja, su respectivo pesaje según se muestra en la Figura 3 y la determinación de su contenido de humedad.

Para la obtención del contenido de humedad se utilizó el equipo F-2000, este aparato mostrado en la Figura 4 se utiliza mundialmente para asegurar y a su vez mejorar el control de calidad en cuanto a contenido de humedad se refiere, ya que dispone dentro de sus características un rango de humedad de entre 6–40 % y es empleado para verificar dicha característica del heno en la hilera o en los fardos.



Figura 3: Obtención del peso de fardo

Acotándose que para caracterizar el fardo de paja en cuanto a densidades, es necesario realizar la corrección por humedad del peso de cada uno de los especímenes, todo ello conforme la normativa estadounidense RB476-13 [27].



Figura 4: Ensayo de contenido de humedad

2.5. Revocado de los fardos de paja

Con la dosificación especificada, se procede al cálculo de la cantidad de materiales. Para el encofrado de los fardos se empleó tabla típica rústica de 5 cm de espesor, material que se presenta en la Figura 5, se programaron dos días para el trabajo donde los encofrados presentados se emplean para revocar el primer lado de los fardos, para posteriormente al día siguiente desencofrar y realizar la colocación del mortero en la otra cara de la mampostería. Cada encofrado tiene señalado en su interior el nivel de referencia para cumplir un espesor adecuado de variación entre 3–4 cm, en la Figura 6 se pueden observar los primeros fardos revocados, con el mismo procedimiento se revocaron los siguientes fardos.

Se programó el ensayo de Módulo de Elasticidad-Resistencia a la compresión a los 28 días.

2.6. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja desnudos (no revocados)

Para la determinación de la propiedad se toma como base la investigación de Maraldi [41]



Figura 5: Encofrado tipo para revoco



Figura 6: Revoco de fardos de paja

denominada “Analysis of the parameters affecting the mechanical behavior of straw bales under compression”. En esta investigación se caracterizan fardos de diferente tipo, el estudio clasifica al fardo hecho con trigo, avena y “otros materiales” prediciendo el módulo de elasticidad mediante el modelo $E \propto p^2$ ecuación cuyo concepto establece que el módulo de elasticidad se puede predecir mediante la densidad del material al cuadrado, por consiguiente es una relación directamente proporcional. La investigación citada se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Relación entre el módulo de elasticidad del fardo de paja y la densidad para diferentes subgrupos

Relación	Denominación	Posición	Relación $E \propto p^2$
1	Otros	Plano	$26,25p^2$
2	Otros	Canto	$25,53p^2$
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$
5	Avena	Plano	$16,65p^2$
6	Avena	Canto	$13,90p^2$

Donde el valor del módulo de elasticidad se encuentra en Pa y la densidad en kg/m^3 .

2.7. Módulo estático de elasticidad en fardos de paja revocados

Para la determinación del módulo estático de elasticidad se empleó 2 deformímetros ubicados en la parte izquierda y derecha del fardo de paja revocado los cuales se observan en la Figura 7 y 8; y se ocupó la norma ASTM C469 [38] para dicho ensayo con el método de la tangente cuerda, para la obtención del módulo se utilizó la ecuación (1).

$$E = \left(\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \right), \quad (1)$$

donde E : módulo de elasticidad cuerda en MPa, σ_2 : esfuerzo correspondiente al 40 % de la carga de rotura, σ_1 : esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal ε_1 de 5 millonésimos MPa, ε_2 : deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 .

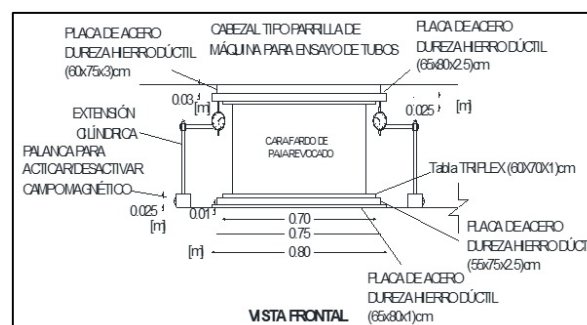


Figura 7: Ubicación de los deformímetros longitudinales para ensayo de módulo de elasticidad

En la Figura 9 se presenta un esquema general de un ensayo típico, se visualizan los datos a considerar en el método tangente-cuerda para la obtención del módulo, según la ecuación (1). Se ha seleccionado el método de la tangente cuerda ya que dicho procedimiento toma en consideración el mayor número de datos para el cálculo del módulo de elasticidad, además de la deformación longitudinal de 5 millonésimos MPa la cual se considera el valor más real para obtener esta propiedad.

Cabe recalcar que, inicialmente se obtuvieron 2 módulos de elasticidad para cada fardo revocado



Figura 8: Dispositivo de acoplamiento para deformímetro longitudinal

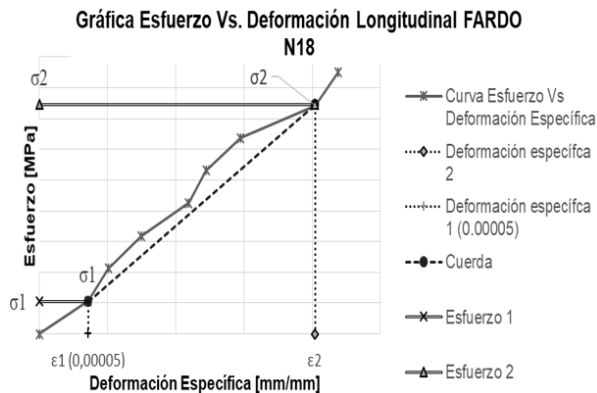


Figura 9: Método de la tangente-cuerda, gráfico esfuerzo vs deformación

debido al empleo de 2 deformímetros por ensayo, posteriormente a aquello, se consideró necesario realizar un promedio de las deformaciones obtenidas por cada nivel de carga, realizando las correspondientes curvas σ vs ε y diferenciándose de acuerdo a las condiciones de los ensayos (orientación en plano o canto y de acuerdo a espesor del recubrimiento); determinando de esta manera el módulo de elasticidad promedio experimental

para fardos de paja en posición plano, canto y con espesor de 3 a 4 cm.

Para el caso de σ_1 se tomó el rango de datos de esfuerzo y deformación determinándose la pendiente de esta sección al momento del asiento del cabezal en el revoco del fardo para multiplicarse por la deformación de 5 millonésimos, obteniéndose σ_1 y ε_1 (0,00005). Para σ_2 se consideró la toma de datos hasta el 40 % de la carga de rotura y por ende esfuerzo proyectado, se tomó el rango de esfuerzo y deformación para el cálculo de su pendiente, calculándose de esta manera σ_2 y ε_2 y por ende el cálculo del módulo E . Vardy [21] realiza el cálculo del módulo de elasticidad con la metodología del módulo cuerda, la diferencia en el cálculo de la propiedad con la presente investigación recae en la consideración del σ_2 más allá del 40 % de la carga de rotura, esto no fue posible para el estudio dado que fue necesario el retiro de los equipos antes de la rotura para asegurar la integridad de los mismos.

2.8. Modelación de vivienda unifamiliar en ETABS

Para comprobar el posible uso del desecho agroindustrial estudiado en la construcción, se realizó la modelación estructural de una vivienda (120,35 m²) con muros portantes de fardos de paja en donde se utilizó como dato necesario el módulo de elasticidad obtenido en esta investigación.

La estructura modelada posee 2 pisos, misma que se observa en la Figura 12, con una altura de entrepiso de 2,75 m; con cubierta y el sistema estructural conformado por muros portantes de fardos de paja revocados con las propiedades obtenidas. El entrepiso es un entablado de madera con espesor de 3,5 cm; cubierta con altura de onda (espesor modelado) de 3,7 cm. Vigas perimetrales de entrepiso de 20 × 25 cm, para soporte de cercha más cubierta de 6,5 × 14 cm, longitudinales e interiores 6,5 × 14 cm y para conformación de cerchas de 4,5 × 9 cm. Todo el material a excepción de los muros, corresponde a madera tipo B, madera denominada “Colorado” [42], misma que no presenta ningún ataque microbiológico o de insectos, no tiene deficiencias de secado, alabeos, fendas, deformaciones ni desgarros y que cumple

con todas las especificaciones tanto mecánicas, técnicas y tecnológicas. Un detalle de aquellas especificaciones se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Especificaciones técnicas para madera tipo B [15]

Esfuerzo a la flexión	150 kg/cm ²
Tracción paralela a las fibras	105 kg/cm ²
Compresión paralela a las fibras	110 kg/cm ²

Se presenta la configuración arquitectónica en planta para el piso 1 y 2 en las Figuras 10 y 11, en la mismas se pueden observar la distribución de espacios.



Figura 10: Vista en planta, primer piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

A continuación, se puede observar la vivienda modelada en 3D y en la Figura 13 se presenta una sección de la configuración del material tipo sánduche (revoco-fardo-revoco), sistema a modelar en ETABS más adelante.

Se presenta una sección del material tipo sánduche caracterizado, y su ubicación en la vivienda.



Figura 11: Vista en planta, segundo piso de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja

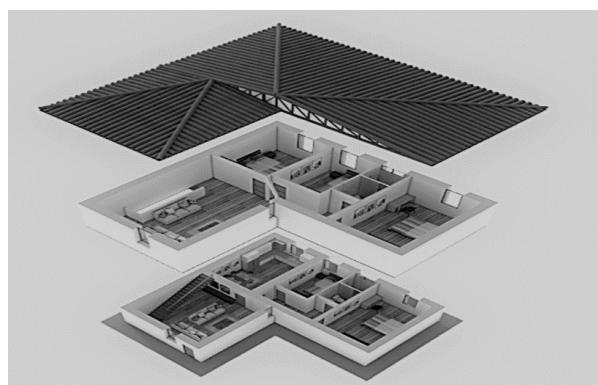


Figura 12: Vista en 3D de vivienda unifamiliar con muro de fardos de paja revocados

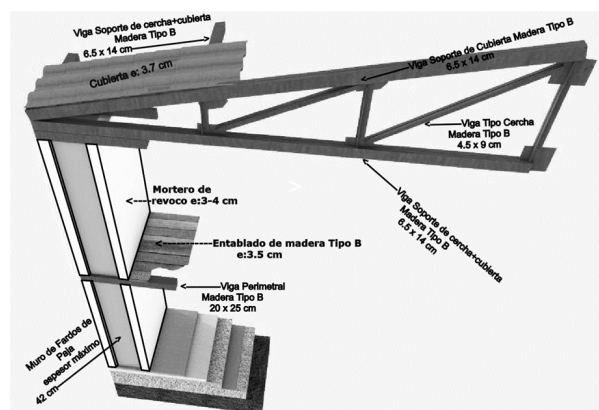


Figura 13: Muro de fardo de paja, sección vista tipo sánduche

3. Resultados y discusiones

3.1. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos realizada la caracterización del fardo de paja antes y después del revoco aplicado.

3.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad promedio de los 20 fardos que conforman la muestra es 10,3 %. Para una mejor observación e interpretación de estos resultados con el límite máximo de contenido de humedad, se presenta la Figura 14, la misma que detalla el contenido de humedad obtenido en cada fardo de paja.

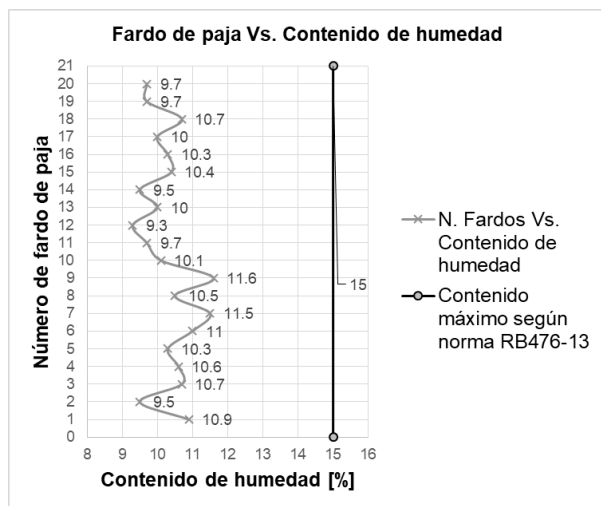


Figura 14: Fardo de paja vs. Contenido de humedad

Por consiguiente, los fardos de paja cumplen con dicha disposición ya que los resultados obtenidos no sobrepasan el límite máximo permisible.

3.1.2. Densidad aparente

La normativa estadounidense RB473 [27] en su apéndice denominado “Construcción con fardos de paja”, estipula la necesaria corrección por humedad que se debe realizar en el peso de los fardos de paja previo cálculo de la densidad aparente. Dicha corrección consiste en determinar el valor representativo del contenido de humedad en el fardo de paja, posteriormente restarlo del peso del material y proceder al cálculo de la densidad mediante la relación masa sobre volumen de acuerdo con la ecuación (2).

$$D.A = \frac{\text{Peso}_{\text{fardo}} - (\text{Peso} \cdot \text{Cont}_{\text{Humedad}})}{\text{Volumen}} \quad (2)$$

En la Figura 15 se presenta el esquema representativo de los valores de densidades aparentes corregidas cuyo promedio fue 88,83 kg/m³, de tal forma que se puede observar que ningún valor es inferior al valor mínimo permisible ni superior al valor máximo permisible, por consiguiente, todos los fardos de paja cumplen los requisitos de caracterización para su uso.

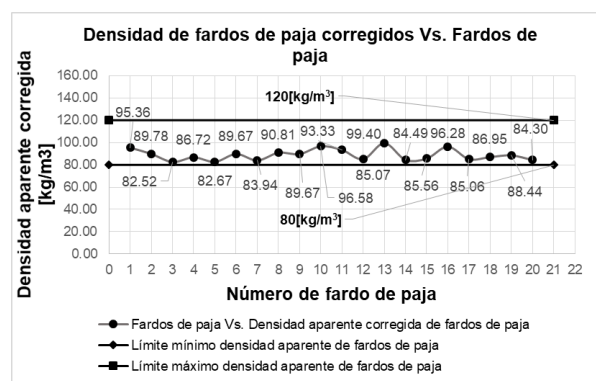


Figura 15: Densidad de fardos de paja corregidos vs. Fardo de paja

3.1.3. Módulo de elasticidad en fardo de paja desnudo

La investigación se enfocó únicamente en el fardo hecho a base de trigo, por tal motivo, se seleccionó la relación 3 y 4 de la Tabla 3, no obstante, es necesario aclarar que los resultados de los investigadores en las ecuaciones seleccionadas se determinaron con una densidad promedio del fardo de paja de 146,1 kg/m³. Se realizó una relación entre dicha densidad y la obtenida de manera experimental de los fardos recogidos en Calacalí, que es en promedio 88,83 kg/m³, determinándose en la Tabla 5 las siguientes ecuaciones para el presente estudio.

Con esta relación se procede al cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja desnudo (no revocado), se diferencian por posición y espesor de revoco con la finalidad de discutir el módulo con y sin revestimiento, estos resultados se observan en la Figura 16.

Tabla 5: Relación $e^\infty p^2$ obtenida

N	Identificación	Posición	Relación Maraldi et al	Relación obtenida
3	Trigo	Plano	$12,05p^2$	$7,33p^2$
4	Trigo	Canto	$11,51p^2$	$6,99p^2$

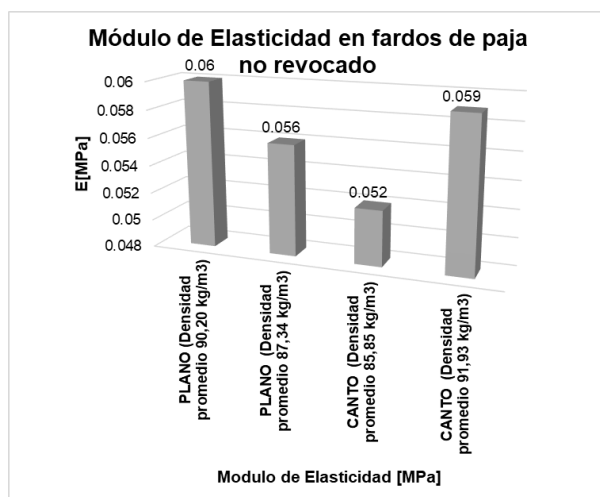


Figura 16: Cálculo del módulo de elasticidad del fardo de paja sin recubrimiento

3.1.4. Módulo de Elasticidad Promedio Experimental de fardo de paja revocado

Una vez realizada la gráfica esfuerzo vs deformación experimental para obtener el módulo de elasticidad de la mampostería, será necesario ponderar los esfuerzos a compresión obtenidos, para el caso de posición plana e: 3 cm, posición plana e: 4 cm, posición canto e: 3 cm y en posición canto e: 4 cm. Además, así como se obtuvo un módulo de elasticidad promedio, es ideal asumir una sola constitución (dimensiones de los fardos para cada caso) diferenciando la posición y el espesor. Con estos datos y habiéndose obtenido las deformaciones generalizadas (promedio) para cada caso se presentan en la Figura 17 los valores generalizados promedios previo al cálculo del módulo de elasticidad en fardos de paja revocados.

Determinándose los siguientes módulos de elasticidad en la Tabla 6, aplicado la metodología de Vardy [21].

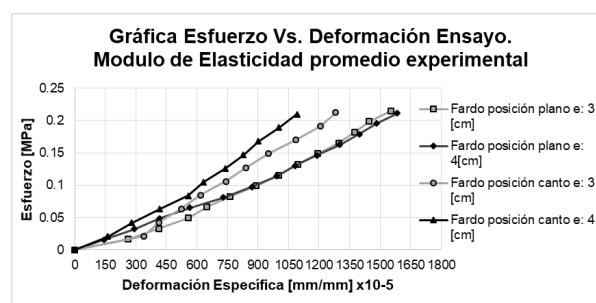


Figura 17: Datos de deformaciones y esfuerzos para módulo de elasticidad promedio experimental

Tabla 6: Esfuerzo y módulo de elasticidad en fardos de paja revocados

Posición	e (cm)	Prom $\delta_{m\acute{a}x}$ (MPa)	A (cm)	L (cm)	H (cm)	E (MPa)
Plano	3	0,43	48	63	33,9	13
	4	0,48	49,6	62	34,2	13,1
Canto	3	0,37	38	62	47,3	15,7
	4	0,42	38	61,4	46,7	18,7

3.1.5. Módulo de elasticidad y densidad de fardos de paja revocados

En lo referido a la Figura 18, se puede observar la relación directamente proporcional que existe entre la densidad de los fardos de paja revocados y el módulo de elasticidad ($E \propto D$), a medida que más alto sea la densidad de los fardos de paja revocados, mayor será el módulo de elasticidad para los mismos. Se obtienen mejores resultados en cuanto a módulo de elasticidad se refiere cuando el fardo se encuentra dispuesto en posición canto, derivado de una densidad mayor con respecto a los fardos en posición plano, esto se debe a la posición propia del fardo, al ser revocado en posición canto el peso del mortero empleado es superior comparado con la posición plano.

3.1.6. Derivas de piso

Con la caracterización realizada al mortero y fardo de paja, se procedió a realizar la modelación, empleando un sistema de muros portantes cuya base de la vivienda es el propio material estudiado (revoco-fardo-revoco), visto en la Figura 13. De la modelación planteada posterior a la caracterización para la evaluación del fardo de paja como material

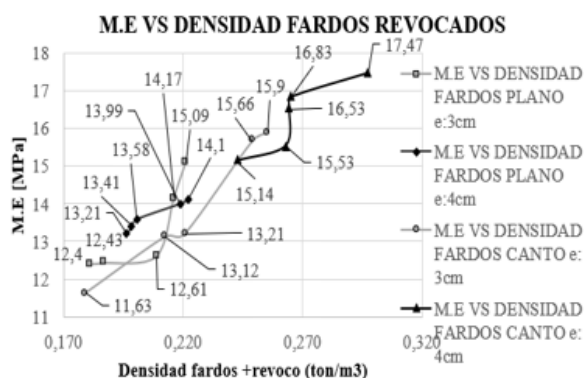


Figura 18: Relación módulo de elasticidad vs. Densidad de fardos de paja revocados

de construcción, se obtuvieron las derivas de piso para los casos de muros con fardos de paja en posición plano y canto, variando el espesor del revoco de 3 a 4 cm, se presenta las derivas máximas obtenida para el caso posición plano e: 3 cm en la Figura 19.

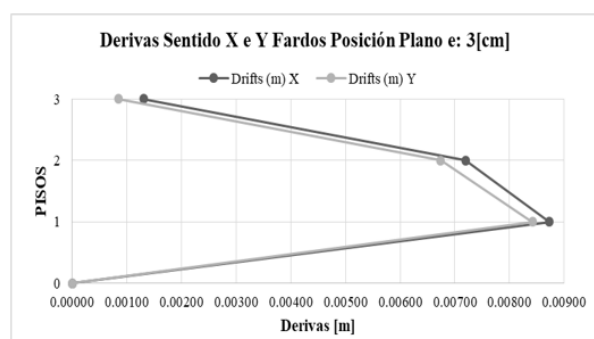


Figura 19: Deriva de piso sentido x e y para modelo fardos posición plano e: 3 cm

De los resultados obtenidos para derivas inelásticas máximas, se puede analizar que la mismas se reducen para posición de plano en sentido x en 4,08 % y en sentido y en 4,23 %, posición de canto en sentido x en 14,77 % y en sentido y en 14,43 % cuando se emplean fardos con un espesor de recubrimiento de 4 cm, por consiguiente, se obtienen mejores resultados cuando el revoco es mucho mayor como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Derivas inelásticas máximas

Espesor (cm)	Posición			
	Plano		Canto	
	x	y	x	y
3	1,96 %	1,89 %	2,03 %	1,94 %
4	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %
mínimo	1,88 %	1,81 %	1,73 %	1,66 %

3.2. Discusiones

3.2.1. Densidad aparente corregida

Réseau Francais RFCP [43], RB473 [27] y [40], coinciden en que para el empleo del fardo de paja como material para la construcción, se debe cumplir con una densidad de entre $80\text{--}120\text{ kg/m}^3$. Si se empleara el fardo tomando en consideración los valores, previa corrección por humedad, se obtiene que el promedio general de densidades con respecto al límite máximo permisible cumple con este requisito en un 82,52 %, es decir un porcentaje aceptable e idóneo. No obstante, es necesario realizar la corrección por humedad debido a las consecuencias que conlleva el uso de fardos húmedos, por tal motivo al realizar la corrección por humedad el cumplimiento de este requisito y que se visualiza en la Figura 15 se disminuye en un 74,03 %. Cabe recalcar que este último porcentaje representa la densidad promedio aparente de $88,83\text{ kg/m}^3$. Investigaciones como las de varios autores, [16], [44], caracterizan al fardo previo a su uso con un contenido de humedad general de 11,02–19 %, es decir, superior al valor representativo usado en la presente investigación y para densidad promedio $84,75\text{ kg/m}^3$.

3.2.2. Contenido de humedad

Según varios autores [45], [27] y Resa [46], para el uso de fardos en la construcción estos deben cumplir con un contenido de humedad menor al 15 %, se puede observar en la Figura 14 que las muestras cumplen con dicho requisito. Por ende la caracterización del fardo de paja sigue un cumplimiento totalmente aceptable.

3.2.3. *Módulo de elasticidad de fardo de paja sin revoco*

En la Figura 16 se presenta los resultados correspondientes a la determinación del módulo de elasticidad de los fardos de paja sin la aplicación de un revoco, de acuerdo al modelo propuesto Maraldi [40] de predicción de módulo de elasticidad en función de la densidad del material, los resultados obtenidos identifican a un material con un módulo pequeño de entre 0,052–0,06 MPa característico de un espécimen totalmente flexible que incursiona en el rango no lineal de manera brusca debido a las solicitaciones de carga. En el caso de Maraldi [41] obtienen resultados entre 0,08–0,11 MPa, valores más altos debido a la densidad superior de 146,1 kg/m³ por encima con respecto a la del presente trabajo que fue de 88,83 kg/m³, corroborándose la relación que afirma que el módulo aumenta a medida que la densidad de este material es mayor, lo que se relaciona típicamente con una mejora en el comportamiento del material.

3.2.4. *Módulo de elasticidad de fardo de paja revocado*

Debido a este comportamiento impredecible por la constitución propia del fardo, varios investigadores citados anteriormente recomiendan la caracterización del fardo de paja con un mortero de recubrimiento, evidentemente el módulo de elasticidad para este caso aumenta, debido al cambio a material compuesto. Tal como se evidencia en la Tabla 6 el valor máximo del módulo de elasticidad en fardo desnudo (no revocado) fue de 0,10 MPa, este valor aumenta considerablemente cuando el fardo es analizado individualmente con un revoco donde el módulo máximo obtenido es de 18,67 MPa.

3.2.5. *Esfuerzo a compresión de fardos de paja*

Para el caso de esfuerzo a compresión se obtiene que para fardos en posición plano con espesor de 3 cm se reduce 9,86 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm; para el caso de fardos en posición canto con espesor de 4 cm se reduce en 12,29 % la resistencia con respecto a fardos con espesor de 4 cm.

3.2.6. *Relación Densidad Vs Módulo de Elasticidad*

Referido a la Figura 18 se puede afirmar que la relación presentada por Maraldi [40] denominada “*Assessment and modelisation of the mechanical performance of straw bales for use in construction*” donde establecen una relación directamente proporcional entre el modulo de elasticidad del fardo en función de la densidad del mismo; se cumple para el presente estudio.

4. Conclusiones

Los fardos en posición canto presentan un mejor comportamiento del material, debido a su aumento en el módulo de elasticidad, por otro lado para fardos en posición plano su módulo es más pequeño pero resisten mejor las solicitaciones a compresión; esto significa que se puede disponer los fardos en posición plano debido a que estos resisten mucho más, pero también se puede considerar el empleo en posición canto por ahorro de espacio en el área de emplazamiento de una vivienda, tomando en cuenta la configuración arquitectónica.

Respecto al comportamiento mecánico general de los fardos de paja se puede concluir que la configuración de los fardos puede generar la suficiente rigidez para que esta sea capaz de soportar cargas producidas por un muro portante, de tal forma que su resistencia esta en función de su posicionamiento (plano-canto), sus dimensiones, densidad, el pretensionamiento de las cuerdas de los fardos y fundamentalmente por el espesor de recubrimiento que se le aplique.

El control de la forma y dimensiones estándar de los fardos de paja representan un aspecto importante para el aseguramiento de mejores resultados estructurales, la forma de los fardos y particularmente su esbeltez influye directamente en la rigidez de un muro hecho a base de este material.

La falta de un control estricto sobre las dimensiones de los fardos y por consiguiente su densidad, afecta en ultima instancia a las propiedades mecánicas de los mismos, razón por la cual los resultados fueron bastante variables y apenas controlables en un fardo con respecto a otro. Este problema debe solucionarse en la producción,

de esta manera se asegura la repetibilidad de los resultados post-ensayo destructivo referido al comportamiento mecánico del fardo de paja. Es decir la caracterización del material y el comportamiento mecánico están directamente relacionados.

La caracterización física realizada en los fardos locales cumplen con los requisitos previos a su uso en la construcción, este comportamiento favorable en conjunto con las propiedades mecánicas se comprueba con los resultados obtenidos en la modelación, puesto que de la simulación realizada mediante software ETABS se concluye que las derivas inelásticas máximas de la vivienda tipo son menores al 2 % para los casos de sentido plano y canto en sentido x e y con espesor de 3–4 cm, por lo que cumple con los requisitos constructivos establecidos por NEC “Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente” y por consiguiente el material es apto para su uso en la construcción.

Se obtuvieron mejores resultados a compresión a medida que el espesor del revoco aumenta, registrando un incremento de resistencia del 36,29 % en posición plano cuando el revoco pasa de 3 a 4 cm, así como un crecimiento del 53,93 % en posición canto cuando el revoco aumenta.

Los resultados servirán para aumentar el conocimiento general de la construcción con fardos de paja y su comportamiento estructural, a su vez ayudará a aumentar la credibilidad de uso aplicando este material como una técnica de construcción convencional y proporcionará una base para las futuras investigaciones sobre el rendimiento estructural de paredes de fardos revocados en el país.

5. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU), diciembre 2019, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2019.
- [2] RIMISP, “Pobreza y Desigualdad. Informe Latinoamericano,” Centro Latinoamericano para el desarrollo rural, Reporte Técnico, 2019.
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Las Condiciones de vida de los Ecuatorianos. Resultados de la Encuesta de Condiciones de Vida-Quinta Ronda, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2010.
- [4] Ministerio de Agricultura y Ganadería MAGAP, “Sistema de información pública agropecuaria. Boletín Situacional. Trigo, Ecuador,” Gobierno de Ecuador, Reporte Técnico, 2017.
- [5] E. Cabezas and A. Sotelo, “Relación del sector agrícola del trigo en la producción de harina en la provincia de Pichincha-Ecuador,” Trabajo Especial de Grado para optar al título de Economista, Universidad Central del Ecuador, 2017.
- [6] M. Villegas and G. Rodríguez, “Cambios en la estructura de créditos hipotecarios ecuatorianos luego de la aplicación de políticas públicas habitacionales. Período 2005–2015,” Trabajo Especial de grado para optar al título de Magister en Finanzas, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, 2017.
- [7] C. Martínez, “Estudio y Aplicaciones de las Construcciones con fardos de paja,” Trabajo de grado para optar al grado en Fundamentos de Arquitectura, Universidad de Valladolid, 2019.
- [8] B. Jones, *Building with Straw Bales: A Practical Manual for Self-Builders and Architects*. United Kingdom: Green Books, 2015.
- [9] V. Ponce, “Análisis de eficiencia energética de muro con fardos de paja y revoques de tierra cruda,” Trabajo para optar al grado de Constructor Civil, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2017.
- [10] G. Minke and F. Manlke, *Manual de Construcción con fardos de paja*. Uruguay, Montevideo: Editorial Fin de Siglo, 2006.
- [11] M. Bernal y E. Montañez, “Uso de la paja en la construcción de panales aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura,” Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, 2018.
- [12] J. Pachala and H. Rosero, “Sistema Constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes,” Tesis de Maestría, Universidad Central de Ecuador, 2016.
- [13] F. Pauta, “La sostenibilidad en la construcción desde las perspectivas de la ordenación territorial y urbanística en Ecuador,” *Estoa. Revista De La Facultad De Arquitectura Y Urbanismo De La Universidad De Cuenca*, vol. 3, no. 4, pp. 55–69, 2014.
- [14] V. Arroba, L. Morales, y J. Monzo, “Diseño y caracterización de un compuesto a base de cal, cemento y fibras naturales para edificaciones,” in *VII Congreso REDU Universidad Yachay Tech, Urcuquí, Ecuador*, ser. Diseño, Arte, Geo-Ciencias, Arqueología, Paleontología, Arquitectura, Patrimonio, Ciudad y Territorio, Geo-Parques, S. Agathos, M. Cevallos, F. Alexis, G. Salum, J. Chacon, A. Sommer, E. Piispa, M. Larrea, M. Alonso, J. Ventura, I. Pineda, O. Chang, y C. Serrano, Ed., vol. 1, 2019, pp. 903–910.

- [15] R. Nitzkin and M. Termens, *Casas de Paja, una Guía para autoconstrucción*. Ediciones EcoHabitar, 2010.
- [16] G. Garas, M. Allam, H. El Kady, and A. El Alfy, "Compressibility of single un-rendered rice straw bales: Characteristics of bales used for building," *ARPVN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5, no. 5, pp. 84–99, 2009.
- [17] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, "Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies," in *16 th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (16th NOCMAT 2015) Winnipeg, Canada*, ser. The Alternative Villages, K. Dick, D. Ruth, D. Mann, F. Delijani, M. Friesen, C. Cowan, A. Skrabek, J. Premak, N. Balakrishnan, M. Riesmeyer, M. Wurkat, Ed., vol. 1. University of Manitoba, 2015, pp. 1–7.
- [18] I. Romans, M. Iborra, y A. López, "Estudio y Análisis de la construcción con balas de paja. Comparación del sistema estructural CUT con la construcción convencional de H.A," Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2014.
- [19] M. Cebada-Sánchez, "Construir con balas de paja," *CERCHA Revista de Arquitectura Técnica*, vol. 1, no. 132, pp. 74–77, 2017.
- [20] C. Rodríguez y G. Lira, "Construcción con fardos. Una alternativa para la Región de la Araucanía ," Tesis de Maestría, Universidad de la Frontera, Temuco, Chile, 2007.
- [21] S. Vardy and C. MacDougall, "Compressive Testing and Analysis of plastered Straw Bales," *Journal of Green Building*, vol. 1, no. 1, pp. 63–79, 2006.
- [22] NEC-SE-DS., *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente*, Ecuador, Ministerio del Desarrollo Urbano y Vivienda, Gobierno de la República de Ecuador, 2015.
- [23] NTE INEN 2380, *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011.
- [24] ASTM C1157M-17, *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [25] ASTM C207-18, *Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [26] NTE INEN 247, *Cal hidratada para uso en mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2015.
- [27] International Code Council, Inc, *2015 International Residential Code*. International Code Council, Inc, 2016, ch. Appendix S Strawbale Construction.
- [28] B. Avon and B. Swartchick, "Straw bale seismic design capacities 2," SENIOR DESIGN PROJECT REPORT, Santa Clara University, 2014.
- [29] A. Solé, "Muros estructurales de fardos de paja: Relación entre los esfuerzos axial y cortante en muros de carga de fardos precomprimidos y revestidos con mortero de cemento," Tesis de Maestría, Universidad Politècnica de Catalunya., 2014.
- [30] NTE INEN 3124, *Obtenido de Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2017.
- [31] ASTM C192M-18, *Standard Practice for Preparation and Curing of Concrete Specimens for Laboratory Testing*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [32] NTE INEN 2518, *Morteros para unidades de mampostería. Requisitos*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [33] ASTM C270-19ae1, *Standard Specification for Mortar Unit Masonry*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [34] NTE INEN 1573, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador, Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010.
- [35] ASTM C31/C31M-19a, *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [36] ASTM C496/C496M-17, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [37] ASTM C511-19, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [38] ASTM 469/C469M-14, *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Ecuador., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [39] Sistema Nacional de Información, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial. Obtenido de Parroquia Calacali, Ecuador." Gobierno de la República de Ecuador, Reporte Técnico, 2015.
- [40] M. Maraldi, L. Molari, G. Molari, and N. Regazzi, "Construction for Sustainability, Green Composites, Materials and Technologies," in *17 th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (17th NOCMAT 2017) Mérida, Yucatán, México, November 26th-29th, 2017*, ser. Construction materials and technologies to deliver affordable housing, P. Herrera, G. Canché, P. González, A. Valadez, F. Avilés, C. Rios, J. Uribe, J. Carrillo, and E. Flores, Eds. CICY CONACYT, 2017, pp. 242–254.
- [41] M. Maraldi, L. Molari, and G. Molari, "Analysis of the parameters affecting the mechanical behaviour of straw bales under compression," *Biosystems Engineering*, vol. 160, no. 1, pp. 179–193, 2017.

- [42] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Guía de diseño. Guía práctica para el diseño de estructuras de madera, de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Ecuador, 1era ed., Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, 2016.
- [43] Réseau Français de la construction en paille, *Règles professionnelles de construction en paille. Remplissage isolant et support d'enduit*, 2nd ed. Francia: Moniteur, 2014.
- [44] H. Abba and M. Abbagana, "Compressive Strength Testing of plastered straw bale," *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 554–568, 2015.
- [45] L. Viera, O. Coox, and J. Rivera, "Determinación de la inercia, conductividad y transmitancia térmica de mampuestos producidos en el cantón Mejía, provincia de Pichincha," Trabajo Especial de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador, 2019.
- [46] F. Resa, "Propuesta de técnicas de autoconstrucción sostenible en la comunidad Tupí Guaraní Río Banda Sur Iguopeigenda (Argentina)," Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

Efficiency of water collection for three types of mesh trappers in rural highlands of the northern highlands of Peru

Luis Vásquez-Ramírez ^{*,a} , Luis Cieza-León ^b , Dante Cieza-León ^c 

^aDepartamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú

^bIngeniero Hidráulico de la Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú

^cFacultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Autónoma de Chota. Cajamarca, Perú

Abstract.- The present investigation was carried out with the purpose of estimating the efficiency of water collection contained in the fog and mist in an area of the heights of the northern highlands of Peru, for this purpose, two-dimensional design of 24 m² of three-meter trappers were used. of meshes: raschel mesh, mosquito net and metal mesh, which were located linearly transverse to the most predominant wind direction, a semi-automatic meteorological station was used for on-site data collection, which after processing allowed Confirm adequate conditions for the collection of water from fog and mist. La Palma, a high Andean town in the northern highlands of Peru located in the Cajamarca region with an altitude above 2800 m.a.s.l. It was the scenario for the application of the research for 92 days in the months of November, December of the year 2018 and January of the year 2019, finding that in all the days of analysis the conditions for water collection were given, concluding that the efficiencies of collection with the three meshes used are very similar, with said average efficiencies being 1,89 L/m²/d, 1,84 L/m²/d and 1,77 L/m²/d, for the metallic, mosquito net and raschel meshes respectively, the results found support the implementation of this type of unconventional water collection in high Andean rural areas with water deficit for population use.

Keywords: trappermists; fog; mists; raschel mesh; mosquito mesh; metal mesh.

Eficiencia de captación de agua con tres tipos de malla atrapanieblas en zonas rurales altoandinas de la sierra norte del Perú

Resumen.- La presente investigación se realizó con la finalidad de estimar la eficiencia de captación de agua contenida en la niebla y neblina en una zona de las alturas de la sierra norte del Perú, para ello se utilizaron atrapanieblas con diseño bidimensional de 24 m² construidas con tres tipos de mallas: malla raschel, malla mosquitero y malla metálica, las cuales fueron ubicadas linealmente en forma transversal a la dirección del viento más predominante, se utilizó una estación meteorológica semi automática para la toma de datos in situ, los cuales luego de su procesamiento permitieron confirmar condiciones adecuadas para la captación de agua de la niebla y neblina. La Palma, una localidad altoandina de la sierra norte del Perú ubicada en la región Cajamarca con una altitud sobre los 2800 ms.n.m. fue el escenario para la aplicación de la investigación durante 92 días en los meses de noviembre, diciembre del año 2018 y enero del año 2019, encontrándose que en la totalidad de días de análisis se dieron las condiciones para captación de agua, concluyéndose que las eficiencias de captación con las tres mallas utilizadas son muy similares, siendo dichas eficiencias promedio 1,89 L/m²/d, 1,84 L/m²/d y 1,77 L/m²/d, para las mallas metálica, mosquitero y raschel respectivamente, los resultados encontrados fundamentan la implementación de este tipo de captación de agua no convencional en la zonas rurales altoandinas con déficit de agua para uso múltiple.

Palabras clave: atrapanieblas; nieblas; neblinas; malla raschel; malla mosquitero; malla metálica.

Recibido: 28 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

1. Introducción

La necesidad de obtener nuevas fuentes de agua va en aumento, por ello se busca nuevas alternativas para solventar las necesidades de abastecimiento de agua, los que requieren de especial atención por ser un bien de primera necesidad para los seres vivos, [1]. Por otro lado Sánchez [2], indica que los efectos

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lvasquez@unc.edu.pe (L. Vásquez-Ramírez)

del cambio climáticos y calentamiento global están haciéndose notar cada vez más, consecuencia de esto es la sequía, que actualmente está afectando al mundo y en específico al continente sudamericano, donde este cambio se demuestra en zonas que antes no estaban clasificadas como desérticas y ahora sí están, conjuntamente la accesibilidad al recurso en muchas zonas rurales afecta directamente. Pues Fessehay [3], indica que recientemente se han estudiado diferentes alternativas tales como captación de fuentes superficiales y subterráneas y el agua de niebla para la solución de la problemática de escasez y calidad de agua a nivel global con la finalidad de ofrecer agua de fuentes seguras.

Es por ello ante la necesidad de agua para cubrir el desabastecimiento actual y futuro, esta investigación se centra en la niebla y neblina como fuente alternativa de abastecimiento de agua, pues Cereceda [4] indica que la niebla es una nube a ras de suelo se compone de gotas de agua que por ser tan pequeñas no tienen peso suficiente para caer y, por lo tanto, quedan suspendidas en el aire y son desplazadas por el viento. Por supuesto dependiendo del tipo de uso es transversalmente importante investigar la calidad de este tipo de agua, por ello investigadores como Ali [5] en su trabajo encontró que las aguas captadas de niebla y neblinas fueron alcalinas, teniendo en consideración que dichas aguas son fácilmente contaminable por la polución en Delhi, Norte de India, mientras que Baquero, Delvasto, & Mejía [6] en su investigación “Evaluación de la calidad de agua de niebla recolectada en Choachí, Colombia” demuestran que la calidad de agua de niebla colectada por medio de un atrapaniebla piloto cumple con la normatividad de Calidad de Agua Colombiana.

Para investigadores como [7] la importancia de los sistemas de captación de agua con base a la neblina puede llegar a constituirse como una alternativa viable que suple en parte la demanda de agua, en zonas donde las fuentes hídricas no son suficientes. Además, es importante tener en cuenta las condiciones meteorológicas donde se ubiquen los atrapanieblas como bien lo resalta Salem [8].

La mayoría de centros poblados rurales de la sierra del Perú ubicados en las alturas de los

andes tienen mucha necesidad de agua, debido a que no existen fuentes superficiales o las que existen se encuentran en puntos muy bajos que hace inaccesible económicamente su explotación. El Centro Poblado La Palma, está ubicado en el distrito de Conchán, de la provincia de Chota, departamento de Cajamarca; esta zona cuenta con un déficit de abastecimiento de agua a razón de que está ubicada en la parte alta de la montaña (2842 ms.n.m); los pobladores realizan esfuerzos físicos o usando acémilas diariamente para llevar agua a sus viviendas desde montaña abajo. Pero, la zona en estudio, presenta una posible ventaja hídrica, que son sus nieblas y neblinas que pueden ser aprovechadas mediante malla atrapanieblas que es una tecnología apta para este tipo de condiciones. Es por ello que se genera la siguiente pregunta como una idea para solventar la problemática del lugar: ¿Cuánto volumen de agua se puede aprovechar usando malla atrapanieblas en el Centro Poblado La Palma-Chota? “Los atrapanieblas son un sistema para atrapar las gotas de agua microscópicas que contiene la neblina y nieblas, mediante una malla a manera de letrero que se opone al curso normal de las nieblas y neblinas que son llevadas por el viento”, [1].

En los últimos años en el mundo se han tenido resultados alentadores sobre la captación de agua a partir de atrapanieblas a diferentes altitudes, pero muy pocas sobre los 2000 ms.n.m., es así que Cereceda [4], luego de un monitoreo durante tres años consecutivos de la colección de agua de niebla en la cima del acantilado de Punta Patache a 52 ms.n.m., mediante 91 neblinómetros de 48 m²; donde obtuvo un caudal promedio de 8,0 L/m²/d. Por otro lado, el investigador Antón [9], en la población de El Tofo (780 ms.n.m.) en Arica-Chile utilizó atrapanieblas de grandes dimensiones hechos de una capa doble de malla de nilón de fabricación local, teniendo como resultado un promedio de cinco litros diarios por metro cuadrado, para 14 días de prueba.

Hidalgo [10], realizó un estudio de uso de atrapanieblas en comunidades campesinas de la provincia de Chimborazo-Ecuador a una altitud de 3200 ms.n.m. para una demanda de agua para sembradíos de maíz logrando obtener con sus

prototipos un volumen de 5,45 L/m²/d. En el Perú el proyecto Acceso al agua por sistemas de atrapanieblas de la Asociación “Peruanos sin Agua” con aguas no convencionales, lluvias y neblina, realizado por Cruz Gutiérrez [11], estimó que, en el distrito de Villa María del Triunfo en el asentamiento humano Villa Lourdes Ecológico II, un sistema de atrapanieblas de 24 m² lograron captar de 8,33 L/m²/d hasta 14,58 L/m²/d., agua que es utilizada por las familias para distintos usos: lavar utensilios/ropa, bañarse, agricultura orgánica, reforestar. Madariaga [12], realizó un estudio del potencial de neblina durante el evento El Niño a través de tres neblinómetros a una altitud de 500 ms.n.m. en las lomas de Ancón muestreando un volumen anómalo de agua de niebla para una temporada seca en verano, lo demuestra con el promedio de 0,94 L/m²/d obtenido del volumen de agua capturado por los neblinómetros. Además Cuellar [13] en su proyecto de investigación realizado en Villa María del Triunfo encontró que la captación del agua de niebla en los meses de mayo hasta diciembre, un atrapanieblas de malla raschel de 12 m² capta en promedio 0,98 L/m²/d.

La importancia de la presente investigación es cuantificar la oferta hídrica de la niebla y neblina en las alturas de la sierra peruana donde la escasez de agua es un problema latente que influyen en el desarrollo personal de los pobladores que se plasma en bajas condiciones de vida, la que se observa claramente en el Centro Poblado La Palma–Chota.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización

El estudio se realizó en la región Cajamarca - Perú, de acuerdo con la Figura 1 con coordenadas UTM 9281714,00 m sur y 762884,00 m este y a una cota de 2842 ms.n.m.

2.2. Materiales

Se utilizaron tres tipos de mallas de fácil adquisición en los mercados locales de la ciudad de Chota para el diseño de los atrapanieblas, las cuales tuvieron las siguientes características:

1. Malla Raschel cuyo material es polietileno con abertura de 2,0 × 2,0 mm. con una resistencia

a la ruptura de 8,8 kg/cm², conductividad al calor de $\lambda = 0,45 - 0,52$ W/m·K.

2. Malla mosquitero de Fibra de vidrio con una abertura de 1,5 × 1,5 mm, con una conductividad de calor de $\lambda = 0,03 - 0,07$ W/m·K.
3. Malla metálica de metal galvanizado con abertura de 1,0 × 2,2 mm, con una conductividad de calor de $\lambda = 12 - 45$ W/m·K.

Dichas mallas fueron fijadas en parantes de tubos de acero de 2” y estabilizadas mediante cuerdas atadas a estacas ancladas al terreno natural.

Se necesitó una canaleta metálica con desembogue en la parte inferior para la recepción del agua captada y luego su traslado mediante una manguera de 1” hacia el tanque de almacenamiento de 600 L.

2.3. Metodología

En la investigación se utilizó el método empírico a través de la medición directa, cuantitativa de campo. Además, se aplicaron medidas de tendencia central para la tipificación de los datos obtenidos y posterior cálculo de las eficiencias de cada una de las mallas, utilizadas en el estudio.

La eficiencia considerada en la investigación, relaciona la tasa de acumulación de agua, por el colector en volumen, por área de atrapanieblas, por tiempo (generalmente en litros por metro cuadrado por día) según la ecuación (1) y depende de las condiciones ambientales, el diseño de los atrapanieblas y la orientación en relación al viento.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Volumen de agua captada}}{\text{Área de malla} \cdot \text{tiempo}} \quad (1)$$

La investigación requirió la toma de datos de campo y su posterior procesamiento, de acuerdo a la secuencia siguiente:

Identificación de la zona de estudio. La localidad de La Palma, es conocido por sus nieblas y neblinas constantes en gran parte del año; para ello fue necesario identificar zonas con presencia de vientos constantes y más predominantes en presencia de nieblas y neblinas. Para el presente estudio la dirección del viento oscilaba entre vientos noroeste

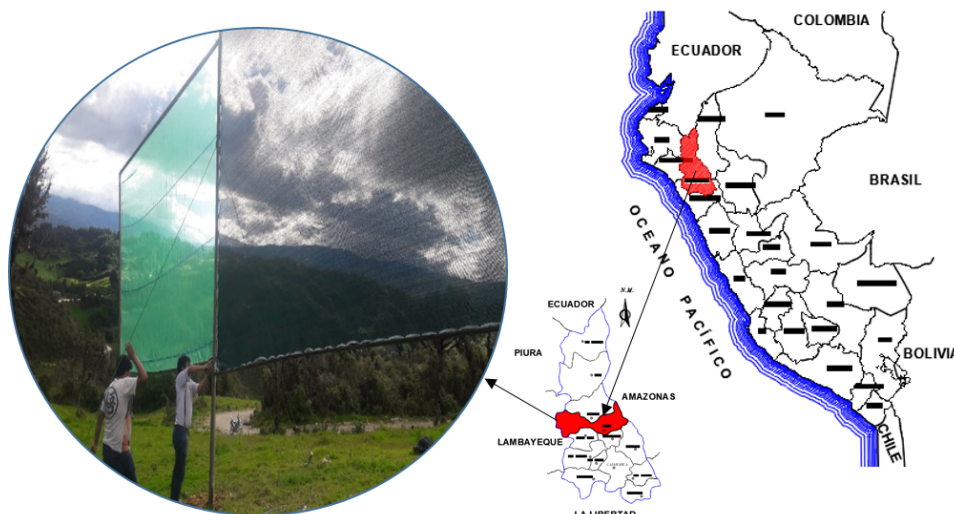


Figura 1: Zona de estudio, ubicación de atrapanieblas

y noreste o viceversa; tomando al norte como la ubicación promedio para colocar las mallas en contra del viento.

Instalación de una estación meteorológica. Una vez identificada la zona de estudio, fue necesario contar con un área despejada para la instalación de la estación meteorológica semiautomática Davis PRO2 según la Figura 2 para la toma de datos climatológicos en campo.

La zona debía estar cerca al área donde se instalaron los atrapanieblas. La estación meteorológica debe estar alejada de cualquier ente que pueda alterar los datos registrados y en un área despejada para que no haya fluctuación de datos.

En cuanto a las veletas de viento y anemómetros se ubicaron entre 1,00 m y 5,50 m (alturas en las que oscila el funcionamiento del atrapanieblas) para identificar la dirección del viento y velocidad del viento a la cual estarán expuestas los atrapanieblas.

Diseño e instalación de los atrapanieblas. Para el caso de la malla raschel se tuvo que cortar acorde a la medida deseada ya que viene en presentaciones de 4 metros de ancho y longitud libre. El borde de la malla se tuvo que bordear con tela lona o similar para evitar su desgarre. Para el caso de la malla mosquitero y metálica se tuvieron que unir las mallas de manera longitudinal, ya que vienen en presentaciones de 0,90 metros de ancho y longitud libre. El borde de la malla se tuvo que bordear con tela lona o similar para evitar desgarre de la malla.



Figura 2: Estación meteorológica semiautomática Davis PRO2. Instalada en la zona de estudio

Las mallas raschel, mosquitero y metálica se fijaron en los marcos metálicos mediante alambre galvanizado n°18 en todo el contorno (incluyendo la canaleta de recolección).

Se excavaron en el terreno dos agujeros con profundidad de 50 cm a una distancia de 6,15 m, para estacionar los atrapanieblas en contra de la dirección del viento predominante (viento norte).

Se fijaron los atrapanieblas desde los codos de unión mediante cuerdas a estacas ancladas al terreno para que no haya caída del sistema debido al viento. La canaleta de recolección debía tener una pendiente mínima de 3 % en dirección al borde de conexión de la manguera que va dirigida al tanque de recolección de agua captada.

2.4. De la toma de datos

En el atrapanieblas. Teniendo en cuenta el diámetro del tanque colector (600 L), se tomó nota de las alturas de agua acumuladas día a día en un horario establecido (para el caso del proyecto fue a las 6:00 horas) durante tres meses. En caso que el tanque se esté por llenar se debía vaciar el agua del tanque e iniciar nuevamente con los registros de altura.

En la estación meteorológica. Los datos que brindaba la estación meteorológica eran temperatura máxima y mínima, temperatura de bulbo seco y húmedo, velocidad y dirección del viento y humedad relativa. Dichos datos eran necesarios para caracterizar al clima del C.P La Palma.

3. Resultados y discusiones

En primera instancia para fundamentar el proceso de condensación y por ende la captación de agua de las nieblas y neblinas en la zona de estudio se estimaron los rangos de las temperaturas de formación del punto de rocío para compararlos con los valores máximo y mínimo de la temperatura ambiente para los 92 días de estudio.

En la Figura 4 se muestra la temperatura máxima (T_{mx} °C) y mínima (T_{min} °C) en relación a la temperatura de punto de rocío (T_{pr} °C - 6:00) y (T_{pr} °C - 18:00) para las 6:00 horas y 18:00 horas respectivamente. Se puede observar que los puntos de temperaturas de rocío de los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019, se encuentran dentro de los rangos de temperatura mínima y máxima, lo que llevó a afirmar que hubo saturación en el ambiente, por ende, la precipitación de la humedad ambiental en superficies como es el caso de las mallas raschel, mosquitero y metálica.

Los volúmenes de agua captados por los atrapanieblas con mallas metálica, mosquitero y raschel en algunos días fueron afectados por la presencia de precipitaciones. En la Figura 5, se muestra que el volumen captado más alto se dio el día 9 de noviembre con valores de 512, 514 y 516 L, con una precipitación de 32 mm. mientras que el volumen captado más bajo se dio el día 29 de noviembre con ausencia de precipitación se captaron volúmenes de 35, 36 y 33 L en las mallas metálica, mosquitero y raschel respectivamente.

Como se puede observar en la Tabla 1, el rango de la captación más desfavorable de agua con atrapanieblas de 24 m² de área, construidas con malla tipo raschel, mosquitero y metálica para los meses de noviembre y diciembre del año 2018 y enero de 2019 oscilan entre los rangos de 35,81 a 46,35 L/m²/d; 38,04 a 47,66 L/m²/d y 38,37 a 49,42 L/m²/d respectivamente.

También se nota que en los 92 días que duró la investigación los valores promedio de la eficiencia en los meses de noviembre 2018, diciembre 2018 y enero de 2019 tienen valores superiores en la malla metálica seguida de la malla mosquitero y al final la malla raschel.

Se identificó que, la presencia de vientos en la zona de estudio del Centro Poblado La Palma llegó hasta 8 m/s, que, según la escala de Beaufort, corresponde al rango de fresquito (brisa fuerte), dichos vientos, según registros realizados, ocasionaron que se genere un mayor volumen de agua, siendo los rangos de viento entre noroeste a noreste y en menor incidencia los vientos suroeste a sureste. Por lo que la posición adoptada para la ubicación de los atrapanieblas fue de manera transversal al promedio de la dirección de los vientos, en este caso viento norte o en caso de viceversa viento sur.

Se registró también que, el promedio de humedades absolutas en los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019 fueron 226,89 g/m³, 236,09 g/m³ y 244,94 g/m³ respectivamente, no han ido acorde a los volúmenes de agua obtenidos en cada mes, esto nos puede ayudar a corroborar que la presencia de vientos ha sido factor determinante para obtener el mayor volumen de agua aprovechable de nieblas y neblinas en el



(a) preparación de malla



(b) proceso de izado

Figura 3: Instalación de atrapanieblas con tres tipos de malla en zona de estudio

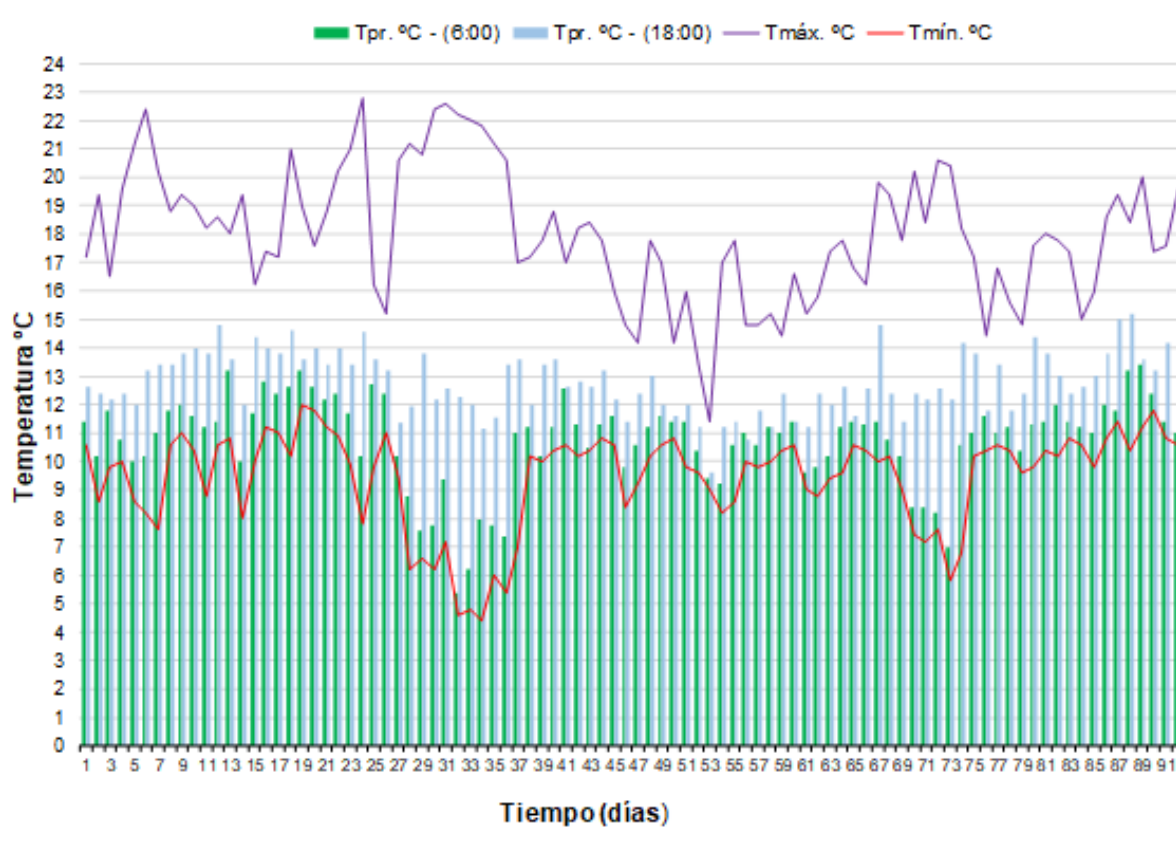


Figura 4: Relación de las temperaturas máximas y mínimas con las temperaturas de punto de rocío en los meses de estudio

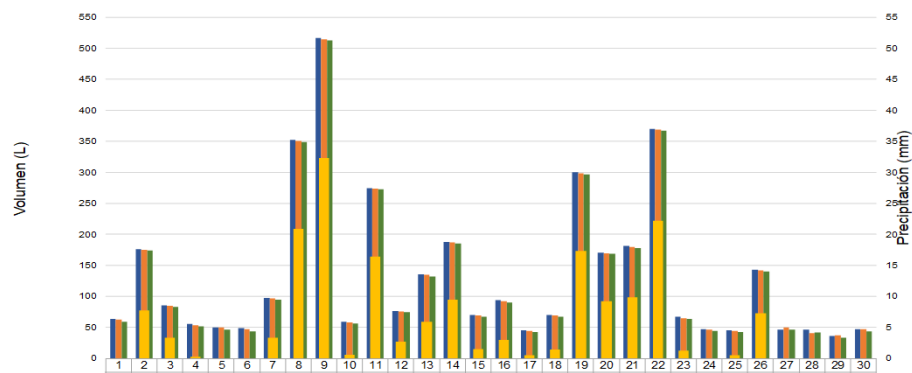
Centro Poblado La Palma.

Se observó que, la malla metálica es más eficiente en la precipitación de gotas de las nieblas y neblinas al entrar en contacto con el material, esto se debería a la mayor conductividad térmica que presenta la malla metálica ($\lambda = 12 - 45 \text{ W/m}$

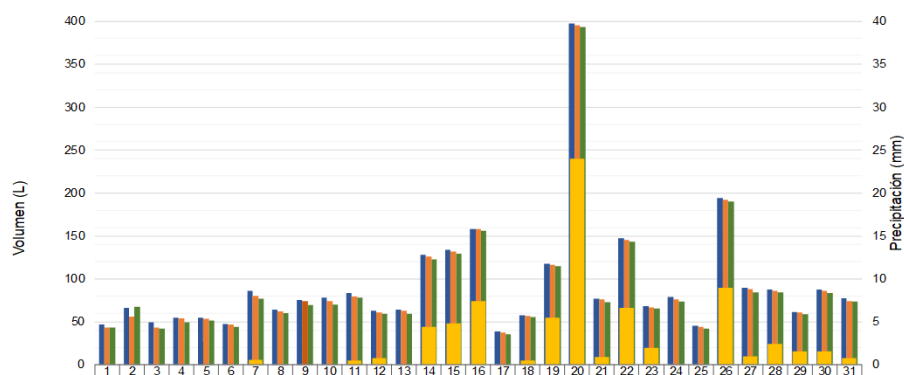
$\cdot \text{K}$) a comparación de la malla mosquitera que es de fibra de vidrio ($\lambda = 0,03 - 0,07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y malla raschel que es de polietileno de alta densidad ($\lambda = 0,45 - 0,52 \text{ W/m} \cdot \text{K}$).

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observó que, con la malla metálica es la más

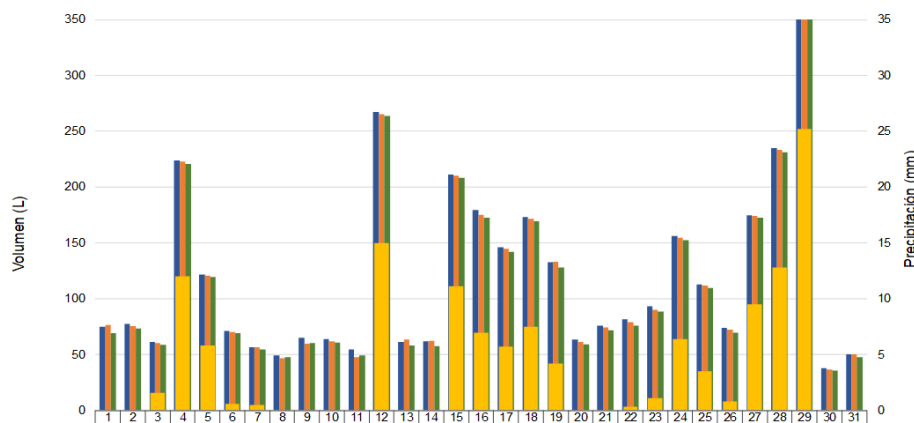
■ V. M. metálica (L); ■ V. M. mosquitera (L); ■ V. M. Raschell (L); ■ Precipitación (mm)



(a) noviembre 2018



(b) diciembre 2018



(c) enero 2019

Figura 5: Volumen de agua captado en litros (L) para tres tipos de malla y precipitación en milímetros (mm)

eficiente en la captación de agua aprovechable proveniente de nieblas y neblinas, como se muestra en la Tabla 2.

Los valores de las eficiencias en promedio de los atrapanieblas con los tres tipos de malla para los meses de noviembre de 2018, diciembre de 2018 y

enero de 2019 fueron encontrados con la ecuación 1 y están entre los valores de 1,49 a 2,06 L/m²/d, valores bajos con respecto a los obtenidos en zonas de costa con altitudes inferiores a los 800 ms.n.m. según reporte de Cereceda [4], quién encontró a una altitud de 52 ms.n.m. una eficiencia de

Tabla 1: Eficiencia de atrapanieblas para los meses de estudio

Mes	Malla	Media ($\bar{x}$)	Desviación estándar (S)	Volumen más desfavorable (L)	Eficiencia de malla ($L/m^2/d$)
nov-2018	Raschel	42,45 L	6,64 L	35,81	1,49
	Mosquitero	44,81 L	6,77 L	38,04	1,59
	Metálica	45,44 L	7,07 L	38,37	1,60
dic-2018	Raschel	60,52 L	14,17 L	46,35	1,93
	Mosquitero	62,31 L	14,65 L	47,66	1,99
	Metálica	64,37 L	14,95 L	49,42	2,06
ene-2019	Raschel	56,52 L	10,82 L	45,70	1,90
	Mosquitero	58,60 L	11,90 L	46,70	1,95
	Metálica	60,07 L	11,60 L	48,47	2,02

Área de malla (m^2): 24,00

Tabla 2: Eficiencia promedio de captación de agua aprovechable de nieblas y neblinas

mes	Eficiencia promedio por malla ($L/m^2/d$)		
	Metálica	Mosquitero	Raschel
nov-18	1,60	1,59	1,49
dic-18	2,06	1,99	1,93
ene-19	2,02	1,95	1,90
Promedio	1,89	1,84	1,77

8,0 $L/m^2/d$, Antón [9] a 780 ms.n.m. encontró un valor de 5,0 $L/m^2/d$ y Cruz Gutiérrez [11] en Villa María del Triunfo encontró valores de 8,33 $L/m^2/d$ hasta 14,58 $L/m^2/d$, a excepción de Madariaga [12] que a una altitud de 500 ms.n.m. en las Lomas de Ancón encontró un valor de 0,94 $L/m^2/d$, y Cuellar [13] los meses de mayo hasta diciembre en año con la influencia del fenómeno del Niño, encontró en Villa María del Triunfo un valor de 0,98 $L/m^2/d$. Es necesario resaltar que si bien es cierto Hidalgo [10] investiga a una altitud de 3200 ms.n.m. obteniendo un valor de 5,45 $L/m^2/d$ en el Ecuador, hay que entender que el comportamiento climático es distinto a nuestra zona de estudio por las diferentes latitudes.

4. Conclusiones

El Centro Poblado La Palma, presenta características favorables para el uso de mallas atrapanieblas en los meses de noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019, ya que, en el total de los

días analizados, se observó que existió punto de rocío o se podría indicar que la humedad relativa llegó al 100 %, lo que ocasionó un aporte en la precipitación de agua proveniente de nieblas y neblinas en la superficie de las mallas.

A través del uso de mallas atrapanieblas con dimensiones de 4,00 × 6,00 m del tipo raschel, mosquitera y metálica, se puede obtener un volumen promedio aprovechable de agua proveniente de nieblas y neblinas de 42,45 L/d , 44,81 L/d y 45,44 L/d en el primer mes, 60,52 L/d , 62,31 L/d y 64,37 L/d en el segundo mes y 56,52 L/d , 58,60 L/d y 60,07 L/d en el tercer mes respectivamente.

Al relacionar la eficiencia de cada malla con la demanda per cápita para una población rural con consumos entre 40 y 50 $L/m^2/d$, para las condiciones climatológicas de la zona será necesario por poblador una malla atrapanieblas de 24 m^2 de área.

5. Referencias

- [1] P. Cereceda, P. Hernández, J. Leiva, and J. d. D. Rivera, Eds., *Agua de Niebla*. Coquimbo, Chile: Dirección General de Aguas, 2014.
- [2] J. Sanchez, "Atrapanieblas tecnología para el atrapamiento de agua, una experiencia exitosa para las políticas públicas en el distrito de Villa María del Triunfo, Lima 2018," Tesis para optar al grado académico de Maestro en Gestión Pública, Universidad César Vallejo. Escuela de Posgrado, 2018.
- [3] M. Fessehay, S. A. Abdul-Wahab, M. J. Savage, T. Kohler, T. Gherezghiher, and H. Hurni, "Assessment of fog-water collection on the eastern escarpment of

- Eritrea,” *Water International*, vol. 42, no. 8, pp. 1022–1036, 2017.
- [4] P. Cereceda, “Los atrapanieblas, tecnología alternativa para el desarrollo rural sustentable,” *Ambiente y Desarrollo*, vol. 16, no. 4, pp. 51–56, 2005.
- [5] K. Ali, G. A. Momin, S. Tiwari, P. D. Safai, D. M. Chate, and P. S. P. Rao, “Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India,” *Atmospheric Environment*, vol. 38, no. 25, pp. 4215–4222, 2004.
- [6] S. Baquero, A. Delvasto, and S. Mejía, “Evaluación de la calidad de agua de niebla recolectada en Choachí, Colombia,” *Inventum*, vol. 13, no. 25, pp. 53–60, 2018.
- [7] P. Osses, R. S. Schemenauer, P. Cereceda, H. Larrain, and C. Correa, “Los atrapanieblas del Santuario Padre Hurtado y sus proyecciones en el combate a la desertificación 1,” *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 27, pp. 61–67, 2000.
- [8] T. A. Salem, M. E. D. M. Omar, and H. A. A. El Gammal, “Evaluation of fog and rain water collected at Delta Barrage, Egypt as a new resource for irrigated agriculture,” *Journal of African Earth Sciences*, vol. 135, pp. 34–40, 2017.
- [9] D. Antón, “Cosechando las nubes,” *CIID Informa*, vol. 17, no. 4, pp. 16–17, 1988.
- [10] D. L. Hidalgo Quinga, “Captación de agua por medio de la técnica de atrapanieblas en las comunidades campesinas de Galte, Cantón Guamote, Provincia de Chimborazo, Ecuador,” Tesis para optar al título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador, 2016.
- [11] A. Cruz Gutiérrez, “Agua y emprendimiento social = Atrapanieblas y huertos urbanos,” in *Universidad de Málaga. Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech. Agua de lluvia*, 2016.
- [12] I. P. Madariaga Olivares, “Evaluación del potencial de neblina mediante el sistema de atrapanieblas en las Lomas de Ancón durante el evento del niño, en el distrito de Ancón, provincia de Lima periodo 2015-2016,” Tesis presentada para optar a título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, 2017.
- [13] J. G. Cuéllar Mayta, “Impacto económico de la implementación de mecanismos capturadores de agua atmosférica para uso agrícola. Villa María del Triunfo, Lima - Perú,” Tesis para optar al título de Economista, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2018.

Estimation model of the Manning roughness coefficient as a function of granulometry in the Santa River, Recuay–Carhuaz sector, Áncash, Perú

Abelardo Díaz-Salas * , Edilberto Guevara-Pérez , Juan Rosales-Cueva ,

Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú

Abstract.- Given that the Manning equation is one of the most used application methods to determine the flow in ungauged rivers, an investigation was carried out to establish a model to determine the Roughness coefficient (n), in a mountainous sector of the river Santa in the department of Ancash, Peru. The novelty of the model is its simplicity since it only uses the effective diameter (d_i), of the river material obtained from the granulometric analysis as an input variable. Three estimation procedures were used, speed measurement, Manning's equation and Cowan's model, and for the analysis, linear and non-linear correlation and regression models; goodness of fit was performed by the Student test, t . The results were validated with field measurements of the hydraulic characteristics of the section at eight sampling points and granulometric analysis of the bed material samples. The best fit model for estimating the Manning roughness coefficient is the potential model, being its mathematical expression $n = 0,0429(d_{10})^{0,1371}$ with a determination coefficient of $R^2 = 0,956$.

Keywords: roughness coefficient; effective diameter; granulometry; Manning's equation; fluvial hydraulics.

Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay – Carhuaz, Áncash, Perú

Resumen.- Dado a que la ecuación de Manning es uno de los métodos de aplicación más utilizados para determinar el caudal en ríos no aforados, se llevó a cabo una investigación para establecer un modelo para determinar el coeficiente de rugosidad (n), en un sector montañoso del río Santa en el departamento de Ancash, Perú. Lo novedoso del modelo está en su simplicidad ya que solo usa como variable de entrada el diámetro efectivo (d_i), del material de río obtenido del análisis de granulometría. Se utilizaron tres procedimientos de estimación, medición de velocidades, ecuación de Manning y modelo de Cowan y para el análisis, modelos de correlación y regresión lineal y no lineal; la bondad de ajuste se efectuó con la prueba t de Student. Los resultados se validaron con mediciones de campo de las características hidráulicas del tramo en ocho puntos de muestreo y análisis granulométrico de las muestras de material de fondo. El modelo de mejor ajuste para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning es el potencial, siendo su expresión matemática $n = 0,0429(d_{10})^{0,1371}$ con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,956$.

Palabras clave: coeficiente de rugosidad; diámetro efectivo; granulometría; Ecuación de Manning; hidráulica fluvial.

Recibido: 26 de agosto, 2020.

Aceptado: 27 de octubre, 2020.

1. Introducción

En los países en vías de desarrollo, como es el caso del Perú, las estaciones de monitoreo de las variables hidrometeorológicas están en un estado incipiente de desarrollo por lo que no siempre se

disponen de registros de caudales; sin embargo, esa información es necesaria para el estudio del régimen hidrométrico y el diseño de las estructuras hidráulicas para el aprovechamiento del agua.

Bajo las condiciones expuestas se suelen usar procedimientos indirectos desarrollados para zonas carentes de información. La ecuación de Manning permite determinar el caudal en ríos no aforados en base a los parámetros hidráulicos radio hidráulico, pendiente hidráulica y área hidráulica; siendo la dificultad la determinación del coeficiente de rugosidad n de Manning, el mismo que expresa la

* Autor para correspondencia:

Correo-e:abelardo_mad@hotmail.com (A. Díaz-Salas)

resistencia del cauce al escurrimiento del flujo.

En el Perú no existen investigaciones para la estimación directa de n en los ríos; para los estudios hidráulicos se suele adoptar valores establecidos en condiciones similares en otros países con la desventaja que las similitudes son relativas, arrojando resultados generales de rangos muy imprecisos, especialmente para ríos de características muy particulares, como es el caso de los ríos andinos del país, típicos ríos de montaña con presencia de sedimentos gruesos y pendientes elevadas.

Por lo expuesto, se ha llevado a cabo la presente investigación con el objeto de establecer un modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en sitios no aforados del río Santa en el sector montañoso Recuay–Carhuaz. Lo novedoso del modelo está en su sencillez ya que facilita la determinación de dicho coeficiente solo en función de la granulometría del cauce.

2. Revisión de la literatura

Existen muchos estudios realizados para obtener el coeficiente de rugosidad que aplican una serie de métodos y/o fórmulas empíricas.

Investigaciones como la de: Osío [1] indica que se estimó el coeficiente de rugosidad de Manning utilizando las funciones de distribución de velocidades mediante aforo y que el valor de n puede determinarse en función del diámetro medio de las partículas del material de cauce, Fernández [2] menciona que se calcula el n de Manning por diferentes métodos plasmados en la literatura y se realiza un análisis de los mismos, Burgos [3] indica que se logró obtener el n de Manning mediante una ecuación potencial que está en función del diámetro representativo del lecho de río y Pastora [4] desarrolla la evaluación de la ecuación de Manning en un flujo de corriente natural mediante registro de aforos y determina un coeficiente promedio para época seca y lluviosa. Existen otros métodos de estimación, Colmenárez [5], usa modelos digitales de rugosidad topográfica, obtenidos a partir de modelos LIDAR y GPS, y Guzmán [6] utiliza valores de caudales que

se comparan de manera espacial y temporal. En todos ellos los valores obtenidos se adaptan a las condiciones en las que se llevó a cabo la investigación, y al criterio del investigador.

Para el estudio de la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning cuyos resultados se presentan aquí, se usaron cuatro procedimientos hidráulicos generales: medición de la velocidad; medición de la rugosidad; procedimiento de la fórmula de Manning; y Cowan; con el objeto de entender mejor el proceso seguido, a continuación, se describe la base teórica utilizada en la investigación.

2.1. Distribución de velocidades en flujo turbulento

Para la aplicación de los métodos de medición de velocidad y medición de rugosidad, Osío [1] indica que para Prandtl, la capa límite turbulenta en el sentido de que la longitud de mezcla (l), es proporcional a la profundidad del flujo (y), la fuerza cortante (τ), es constante e igual al esfuerzo cortante unitario (τ_0), según se muestran en las ecuaciones (1) y (2).

$$V_f = \sqrt{gRS} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1)$$

$$V = 2,5V_f \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (2)$$

Donde:

V_f : velocidad de fricción, [m/s]

g : gravedad, [m/s²]

R : radio hidráulico, [m]

S : pendiente hidráulica, [m/m]

τ_0 : fricción unitaria en la capa límite, [kg·m/s]

y_0 : altura de rugosidad igual a $k/30$ para superficies rugosas, [m]

k : altura de rugosidad, [m]

ρ : densidad del fluido, [kg/m³]

V : velocidad del agua, [m/s]

ν : viscosidad cinemática, [m²/s]

y : profundidad de sección [m]

De acuerdo con Chow [7], la ecuación (2) se conoce como la Ley Universal de Distribución de

Velocidades de Prandtl – Von Karman, que viene a ser una función logarítmica.

Para superficies lisas, la constante y_0 queda expresada por la ecuación (3).

$$y_0 = \frac{v}{9V_f} \quad (3)$$

De donde se obtiene la ecuación (4).

$$V = 5,75 \cdot V_f \log \left(\frac{y_0 9V_f}{v} \right) \quad (4)$$

En superficies rugosas, se encuentra que la constante y_0 depende de la altura de la rugosidad, ésta se indica en la ecuación (5).

$$y_0 = mk \quad (5)$$

donde, la constante m es igual aproximadamente a 1/30. Sustituyendo y simplificando para superficies rugosas, se obtiene la ecuación (6).

$$V = 5,75 \cdot V_f \log \left(\frac{30y}{k} \right) \quad (6)$$

dada como la distribución de velocidades en flujos turbulentos sobre superficies rugosas. La altura de rugosidad, k , corresponde al diámetro medio de los granos de arena utilizado por Nikuradse, Chow [7].

Mediante el desarrollo de ecuaciones teóricas para flujo uniforme French [8], al comparar la ecuación de Chezy con la ecuación de Manning se obtiene la ecuación (7).

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (7)$$

Además, Rocha [9], indica que para conductos rugosos se tiene la ecuación (8).

$$C = 18 \log \frac{12,2R}{k} \quad (8)$$

donde, C es el coeficiente de Chezy $m^{1/2}/s$.

Siguiendo el análisis de Chow [7] para la interpretación teórica del coeficiente de rugosidad, la relación entre el n de Manning y el valor teórico de la rugosidad del canal para superficies rugosas, al eliminar el valor de C de Chezy de las

ecuaciones (7) y (8), se obtiene el n de Manning descrita por la ecuación (9).

$$n = \phi \left(\frac{R}{k} \right) k^{1/6}, \quad (9)$$

donde:

$$\phi \left(\frac{R}{k} \right) = \frac{(R/k)^{1/6}}{18 \log \left(\frac{12,2 \cdot R}{k} \right)} \quad (10)$$

De las ecuaciones (9) y (10), se deduce que el valor de k está dado por la ecuación (11).

$$k = \frac{12,2 \cdot R}{10 \left(\frac{R^{(1/6)}}{18n} \right)} \quad (11)$$

donde, k es conocido como la altura efectiva de las irregularidades formados por los elementos de rugosidad.

Las investigaciones realizadas sobre el tema indican que para un amplio rango de R/k , la variación en $\phi(R/k)$ es pequeña, y ésta, puede suponerse constante e igual a un valor promedio. Es así que, la ecuación (9) queda determinado en función de la potencia de la altura de rugosidad (k), [7].

Según la distribución teórica de velocidades en canales rugosos, se ha desarrollado los métodos de medición de velocidades y medición de rugosidad, [7]. Asimismo, se pueden usar dos métodos adicionales que se describen a continuación para obtener n de Manning.

2.2. Método de medición de la velocidad

De la ecuación (6), el coeficiente n de Manning puede determinarse por medio de mediciones de velocidades a 2/10 de y , desde el espejo de agua ($V_{0,2}$), dado por la ecuación (12).

$$V_{0,2} = 5,75 \cdot V_f \cdot \log \left(\frac{24y}{k} \right) \quad (12)$$

Asimismo, a 8/10 de y , ($V_{0,8}$), expresado por la ecuación (13).

$$V_{0,8} = 5,75 \cdot V_f \cdot \log \left(\frac{6y}{k} \right) \quad (13)$$

Eliminando V_f en las ecuaciones (12) y (13), sustituyendo $x = \frac{V_{0,2}}{V_{0,8}}$, simplificando y resolviendo se obtiene la ecuación (14).

$$n = \frac{(x - 1)y^{1/6}}{5,57(x + 0,95)} \quad (14)$$

Donde, y representa la profundidad en la sección considerada en metros.

2.3. Método de la medición de la rugosidad

En este método se supone que la ecuación (10) para la función $\phi(R/k)$ es aceptable. Luego, el valor de n puede determinarse mediante la ecuación (9) conocido la altura de rugosidad, k .

2.4. Método de la fórmula de Manning

Conocidos los parámetros involucrados en dicha fórmula, en el punto de interés, se despeja la fórmula de Manning para obtener el valor de n , que viene a estar dado por la ecuación (15).

$$n = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{Q} \quad (15)$$

Donde, A , es el área hidráulica, R , radio hidráulico, S , pendiente media y Q , es el caudal en la sección transversal de interés.

2.5. Método de Cowan

El modelo de Cowan está definido por la ecuación (16).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m_5 \quad (16)$$

Los valores se obtienen de la Tabla 1 los cuales están en función del perímetro, irregularidades, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y meandros.

2.6. Granulometría de material de río

La toma de muestras (García [10]), y la distribución granulométrica del lecho de río son de gran utilidad, los resultados obtenidos de la granulometría son utilizados en diversos procesos fluviales como la estimación de parámetros de rugosidad, Crozzoli [11].

La granulometría permite calcular mediante el análisis granulométrico por tamizado los porcentajes de granos en función de sus tamaños. Se designa por d_n que es el tamaño, tal que el $n\%$ del peso del material es menor que dicho parámetro.

2.7. Correlación y regresión

2.7.1. Coeficiente de correlación (r)

Villón [12], indica que el coeficiente de correlación es el estadístico que permite medir el grado de asociación de dos variables linealmente relacionadas. Sus valores varían entre -1 y 1. Si X e Y son independientes, $r = 0$.

2.7.2. Coeficiente de determinación (r^2)

De acuerdo con Villón [12], r^2 , indica que la proporción o porcentaje de la variación total de la variable dependiente Y , es explicada por la variable independiente X ; varía en el rango de $0 \leq r^2 \leq 1$, o de 0 a 100 %. Cuanto mayor sea el r^2 , mayor será la confiabilidad de las predicciones y menores serán los errores predictivos. Para la regresión lineal simple se tiene que, $r^2 = R^2$ y pueden ser denotados con letras mayúsculas, significando lo mismo.

2.7.3. Regresión lineal simple

Según Villón [12], la regresión lineal simple permite estimar en forma lineal una variable dependiente Y , en función de una variable independiente X ; se suele usar para completar datos o extender un registro. El modelo de regresión lineal está dado por la ecuación (17).

$$y = a + b \cdot x \quad (17)$$

Donde, x , es la variable independiente o conocida, y , es la variable dependiente o que se trata de predecir, a y b son parámetros que son determinados por el método de mínimos cuadrados.

2.7.4. Regresión no lineal

La regresión no lineal indica que existen una asociación no lineal entre la o las variables dependientes e independientes. Entre los modelos no lineales más conocidos se tiene: exponencial, potencial y logarítmico. A continuación, se indican

Tabla 1: Criterios y valores numéricos para la ecuación de Cowan [9]

Condición del cauce			Valores
Material considerado	Tierra	n_0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de Irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variación de la Sección Transversal	Gradual	n_2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010–0,015
Efecto de las Obstrucciones	Insignificante	n_3	0,000
	Menor		0,010–0,015
	Apreciable		0,020–0,030
	Severo		0,040 - 0,060
Vegetación	Baja	n_4	0,005–0,010
	Media		0,010–0,025
	Alta		0,025–0,050
	Muy alta		0,050–1,000
Cantidad de Meandros	Menor	m_5	1,000
	Apreciable		1,150
	Severa		1,300

las ecuaciones del modelo de regresión no lineal: Exponencial, está dado por la ecuación (18).

$$y = ab^x \quad (18)$$

Potencial, está dado por la ecuación (19).

$$y = ax^b \quad (19)$$

Logarítmica, está dado por la ecuación (20).

$$y = a \ln x + b \quad (20)$$

Estas ecuaciones pueden ser resueltas por el método de los mínimos cuadrados con un artificio adecuado pudiéndose reducir a ecuaciones lineales y aplicándose una regresión lineal simple.

3. Metodología

Para obtener el modelo, en primer lugar, se han obtenido los valores del coeficiente de rugosidad por los métodos: distribución de velocidades, fórmula de Manning y Cowan, con datos obtenidos mediante aforos que es una actividad importante para conocer la disponibilidad del recurso hídrico, Díaz [13] realizados por el Laboratorio de Calidad

Ambiental, Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - UNASAM. Luego se llevó a cabo un análisis estadístico relacionando los diámetros efectivos de granulometría por cada punto de aforo con los valores del coeficiente de rugosidad para los tres métodos seleccionados.

Descripción del área de estudio

El área de estudio, se ubica en la región Ancash, provincias de Recuay, Huaraz y Carhuaz, y comprende los distritos de Catac, Ticapampa, Recuay, Olleros, Huaraz, Independencia, Jangas, Tarica, Pariahuanca y Anta, ubicada entre las coordenadas UTM 8915258.00 m S, 233116 m E aguas abajo del puente Catac – Recuay, y, 8963881.28 m S, 215570.84 m E aguas arriba del aeropuerto Anta – Carhuaz, entre una altitud que varía de 3545 msnm y 2743 msnm respectivamente, perteneciente a la Cuenca del Río Santa (Figura 1).

3.1. Información básica

A continuación, se describen resumidamente las fuentes y la información usada en la investigación:

1. Información cartográfica: Cartas Nacionales (19-h, 19-i, 20-h y 20-i), con escala 1:100000,

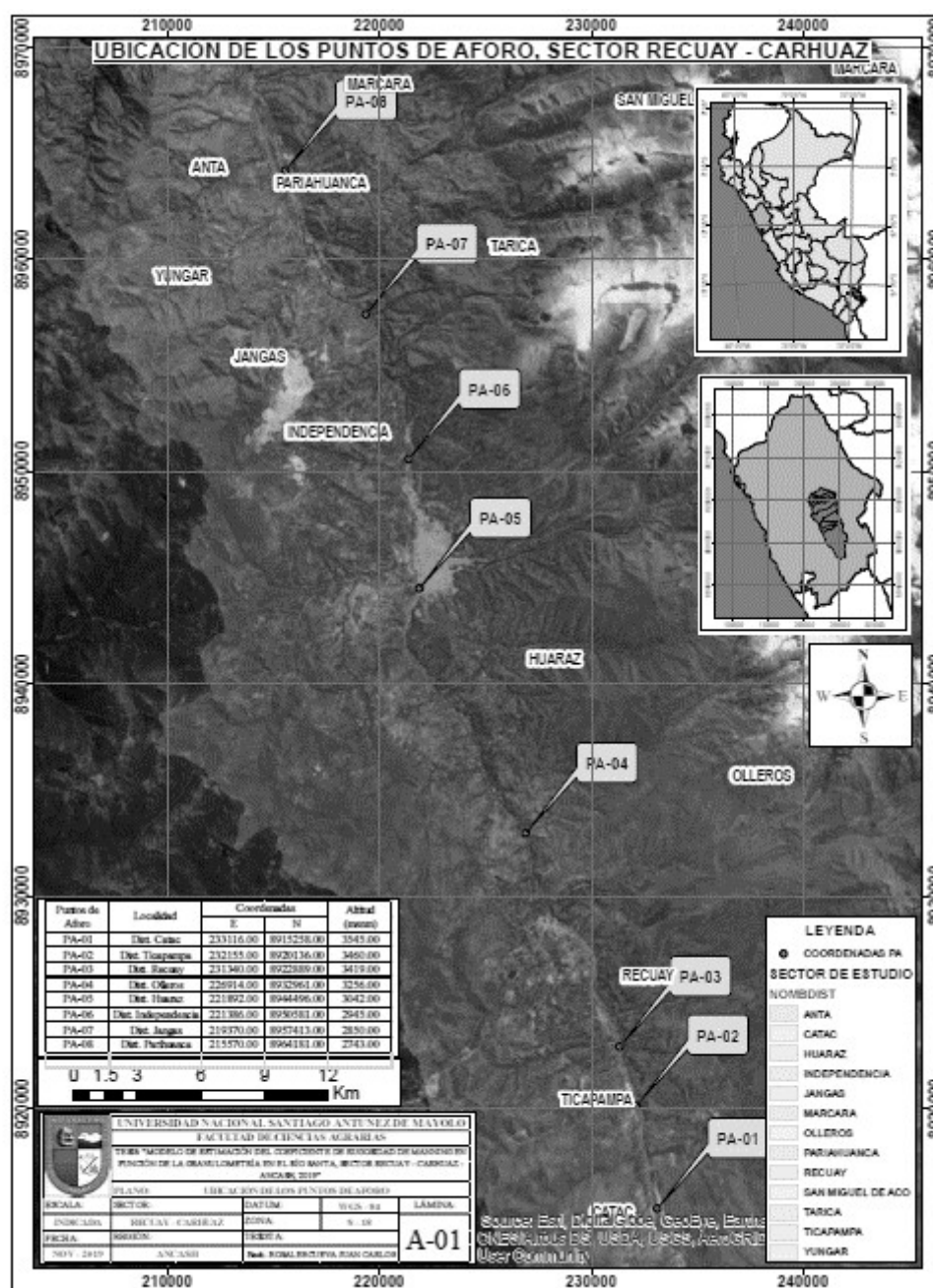


Figura 1: Ubicación de puntos de aforo, sector Recuay–Carhuaz

y el modelo de elevación digital (DEM) con resolución de 30 metros.

- Información topográfica: Obtenida mediante uso de equipos topográficos en cada uno de los puntos de aforo y sus respectivos tramos.
- Información hidráulica: Obtenida mediante aforos, Villón [14] por el Servicio de monitoreo de agua del Laboratorio de Calidad

Ambiental – UNASAM, en periodo de estiaje. Los puntos de aforo se muestran en la Figura 1.

3.2. Fases de estudio

3.2.1. Fase de campo

En la fase de campo, se procedió a la recolección de la información y datos de la zona de estudio tales como: parámetros hidráulicos de secciones transversales de sitios específicos o puntos de aforo (PA), pendiente, material de lecho y velocidades

de flujo mediante aforo con correntómetro. Así mismo, fotografías e imágenes satelitales. También se realizó la verificación y planificación en campo, como el reconocimiento del entorno y su ubicación de puntos de aforo (PA), seleccionándose ocho (08) puntos con su respectivo tramo de estudio. La pendiente se realizó por medición directa haciendo uso del nivel de ingeniero y la extracción de material de río se realizó en cada punto de muestreo.

3.2.2. Fase de gabinete

En la fase de gabinete se procesó la información, estimando el coeficiente n de Manning, los diámetros efectivos de partículas, d_i , y estableciendo las relaciones entre ambos parámetros y los modelos de estimación correspondientes. Finalmente se validó el modelo establecido de modo tal de aceptarlo como representativo para el área de estudio. A continuación, se resume el procedimiento:

1. Identificación de los puntos de aforo (PA) y procesamiento de la información de la sección transversal.
2. División del ancho de la sección transversal, en un número de subsecciones con un mínimo de un 10 % por cada una de éstas, Villón [14].
3. De las curvas de distribución de velocidades se obtuvo el valor correspondiente a la velocidad a dos y a ocho decimos de la profundidad $V_{0,2}$ y $V_{0,8}$; es decir, a 0,8 y 0,2 respectivamente del fondo del canal, ICC [15] y Tapia [16]. El coeficiente n de Manning se calcula en cada sub sección, en las secciones transversales de los PA aplicándose la ecuación (14), conocido el tirante hidráulico y , y la relación de velocidades x , el valor de n para la sección total se estimó como la media de los valores de n de las subsecciones.
4. El valor de n se calcula en función de la altura de rugosidad k , mediante las ecuaciones (9), (10) y (11).

5. Conocido el A , R , S y Q , mediante la ecuación (15) se determinó el coeficiente n de Manning.
6. De la Tabla 1 y la ecuación (16) se determinaron los valores de n de Manning.
7. El análisis granulométrico del lecho del río por punto de aforo (PA) se hizo mediante el tamizado siguiendo la norma ASTM D-422, Gutiérrez [17], obteniéndose así las curvas granulométricas con sus respectivos diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} , y d_{90} .
8. Mediante análisis de regresión se estableció el modelo de estimación del coeficiente de rugosidad. Se probaron funciones de relación, lineal y no lineal aplicando las ecuaciones (17), (18), (19) y (20), Sánchez [18]. Mediante la prueba t de Student. El t calculado, t_c esta dado por la ecuación (21).

$$t_c = \frac{r\sqrt{n_1 - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (21)$$

Donde, n_1 , es número de pares de valores. Así mismo, el t tabular, t_t se obtiene de las tablas estadísticas de la distribución t preparadas para este fin con un nivel de significación α o una Probabilidad de $(1 - \alpha)$ y con Grado de Libertad ($GL = n_1 - 2$). Es decir, $\alpha/2 = 0,025$ y $GL = n_1 - 2$. Por último, se aplicó el criterio de decisión: si $|t_c| \leq t_t$, entonces $r = 0$ por tanto no hay correlación significativa; en cambio, si $|t_c| > t_t$, entonces $r \neq 0$ por tanto es significativo y existe correlación entre las variables.

9. Finalmente se contrasta y se valida el modelo con mayor valor de coeficiente de correlación propuesto en la estimación del coeficiente de rugosidad en función de la granulometría, con el método de la fórmula de Manning usando los parámetros hidráulicos medidas directamente en campo, los cuales se consideran los menos subjetivos de los métodos de estimación del n de Manning.

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Descripción de los puntos de aforo (PA)

En la Tabla 2 se presentan la ubicación de los ocho (8) puntos de aforo seleccionados en función de una combinación de criterios, tramos vulnerables y facilidades de medición de los parámetros hidráulicos.

4.2. Parámetros hidráulicos de secciones transversales

En la Tabla 3 se presentan los parámetros hidráulicos de las ocho secciones de aforo seleccionadas (A , área hidráulica, P , perímetro mojado, R , radio hidráulico, S , pendiente media y Q , caudal) que son aplicados al cálculo del n de Manning.

4.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para los n de Manning para cada uno de los puntos de muestreo y para cada uno de los procedimientos hidráulicos seleccionados.

4.4. Coeficiente de rugosidad mediante medición de rugosidad

En la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos de las alturas de rugosidades, k .

Con dichos resultados se ha realizado un análisis gráfico entre las variables del coeficiente de rugosidad, n , (n calculado mediante medición de velocidades) y la altura de rugosidad, k , que se muestra en la Figura 2. La línea de tendencia a la que mejor se ajusta es a una regresión lineal simple, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9879$; lo que indica que el 98,79 % de la variación del coeficiente de rugosidad, n , es explicada por la altura de rugosidad, k , y el 1,21 % restante es debido a los errores y a otras variables no consideradas.

De igual forma, mediante el análisis estadístico, el t_c es igual a 22,23 y el t_t es igual a 2,447 lo que significa que el t_c es mayor que el t_t , y se concluye que existe correlación significativa entre los coeficientes de rugosidad, n y las alturas de rugosidad, k .

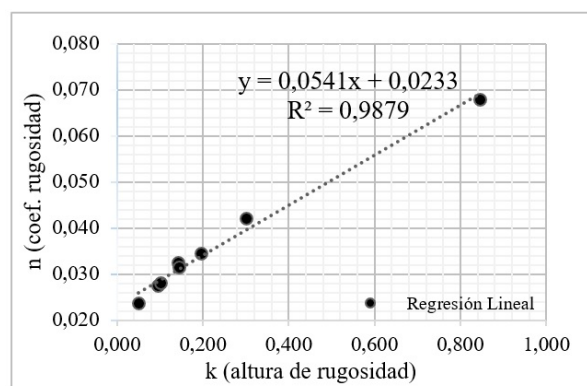


Figura 2: Coeficiente de rugosidad, n , y altura de rugosidad, k

Dónde: n , desviación estándar de n , R , radio hidráulico y k , altura de rugosidades han sido obtenidos según la metodología establecida en la sección 3.2.2.

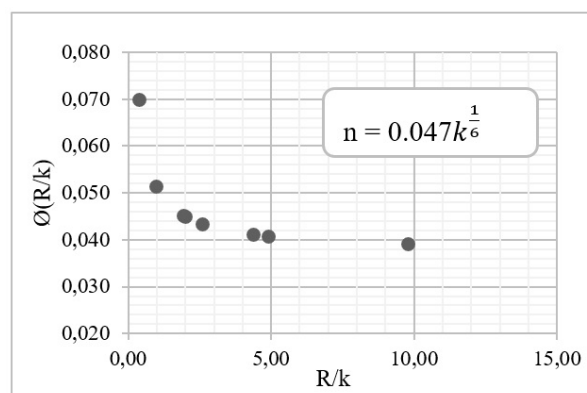


Figura 3: Relación de $\phi(R/k)$ y R/k .

La Figura 3, muestra que para un amplio rango de R/k , la variación de $\phi(R/k)$ es baja; cuyo coeficiente de variación es de 22,90 %, por consiguiente la relación podría aproximarse mediante el valor medio; 0,047 (media de valores de $\phi(R/k)$).

Combinando la Figura 3 y la ecuación (9) se obtiene n en función de la altura de rugosidad, k , dado por la ecuación (22).

$$n = 0,047 \cdot k^{1/6} \quad (22)$$

4.5. Diámetros representativos del lecho de río

De análisis granulométrico se han obtenido los diámetros efectivos d_i , para las muestras de

Tabla 2: Puntos de aforo (PA) en el río Santa, sector Recuay–Carhuaz

Puntos de aforo	Localidad	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Progresiva (km)
		E	S		
PA-01	Distrito de Catac	233116,00	8915258,00	3545,00	0+000,00
PA-02	Distrito de Ticapampa	232155,00	8920136,00	3460,00	5+166,05
PA-03	Distrito de Recuay	231340,00	8922889,00	3419,00	8+188,40
PA-04	Distrito de Olleros	226914,00	8932961,00	3256,00	20+347,90
PA-05	Distrito de Huaraz	221892,00	8944496,00	3042,00	34+460,25
PA-06	Distrito de Independencia	221386,00	8950581,00	2945,00	41+113,30
PA-07	Distrito de Jangas	219370,00	8957413,00	2850,00	49+158,10
PA-08	Distrito de Pariahuanca	215570,00	8964181,00	2743,00	58+024,35

Tabla 3: Parámetros hidráulicos en cada sección transversal

Puntos de aforo	A (m^2)	P (m)	R (m)	S (m/m)	Q (m^3/s)
PA-01	52,420	158,360	0,3310	0,0045	27,724
PA-02	51,460	176,390	0,2917	0,0035	31,179
PA-03	36,950	131,010	0,2820	0,0075	31,018
PA-04	98,450	263,570	0,3735	0,0019	54,290
PA-05	91,300	242,720	0,3762	0,0043	71,346
PA-06	111,650	238,030	0,4691	0,0037	101,387
PA-07	159,280	364,750	0,4367	0,0018	102,944
PA-08	115,100	235,200	0,4894	0,0032	110,651

Tabla 4: Coeficiente de rugosidad, n (medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan)

Puntos de aforo	Método		
	Medición de velocidades (n)	Fórmula de Manning (n)	Método Cowan (n)
PA-01	0,0680	0,0607	0,0530
PA-02	0,0421	0,0428	0,0430
PA-03	0,0324	0,0444	0,0480
PA-04	0,0315	0,0410	0,0380
PA-05	0,0345	0,0435	0,0380
PA-06	0,0276	0,0403	0,0480
PA-07	0,0280	0,0377	0,0330
PA-08	0,0237	0,0364	0,0330
Promedio	0,0360	0,0433	0,0418
Desv estándar	0,0141	0,0075	0,0074
Coef, Variación	0,3905	0,1740	0,1782

sedimentos en puntos de aforo, los que se presentan en la Tabla 6.

Los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90} corresponden a 10 %, 30 %, 50 %, 60 %, 84 % y 90 % de los porcentajes acumulados que pasan la curva granulométrica.

4.6. Relación de los coeficientes de rugosidad y los diámetros efectivos

Para analizar las relaciones entre las variables n de Manning y los diámetros efectivos, d_i , se generaron los modelos estadísticos descritos en la metodología, dados por modelos lineales y no lineales (exponencial, potencial y logarítmico).

Tabla 5: Altura de rugosidades k y función $\phi(R/k)$

Puntos de aforo	n	Des. Est. de n	R (m)	k (m)	R/k	$\phi(R/k)$
PA-01	0,0680	0,0292	0,3310	0,8447	0,3919	0,0699
PA-02	0,0421	0,0319	0,2917	0,3003	0,9714	0,0515
PA-03	0,0324	0,0282	0,2820	0,1411	19,991	0,0449
PA-04	0,0315	0,0201	0,3735	0,1447	25,808	0,0434
PA-05	0,0345	0,0278	0,3762	0,1958	19,207	0,0452
PA-06	0,0276	0,0272	0,4691	0,0958	48,963	0,0408
PA-07	0,0280	0,0202	0,4367	0,1002	43,587	0,0411
PA-08	0,0237	0,0245	0,4894	0,0500	97,971	0,0391
Promedio	0,0360					0,0470
Desv. Est.	0,0141					0,0100
Coef. Var.	0,3905					0,2290

Tabla 6: Diámetros efectivos de material de río

Puntos de aforo	Resumen de los diámetros de las partículas (mm)					
	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	d_{84}	d_{90}
PA - 01	9,651	18,344	25,934	29,681	41,422	54,464
PA - 02	1,060	5,418	13,656	18,762	35,293	44,316
PA - 03	1,586	10,879	17,868	22,615	35,543	42,344
PA - 04	0,659	3,545	8,835	13,759	30,529	35,301
PA - 05	0,904	5,720	15,727	22,436	48,377	58,811
PA - 06	0,939	3,145	6,372	8,433	41,340	54,412
PA - 07	0,491	2,634	8,551	13,137	33,420	44,442
PA - 08	0,202	0,734	3,473	8,300	24,170	29,394

Tabla 7: Análisis estadístico del Modelo Lineal entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,887	0,942	6,873	Si	0,931	0,965	8,984	Si
d_{30}	0,764	0,874	4,402	Si	0,921	0,960	8,370	Si
d_{50}	0,762	0,873	4,377	Si	0,841	0,917	5,642	Si
d_{60}	0,680	0,825	3,570	Si	0,739	0,860	4,117	Si
d_{84}	0,165	0,406	1,088	No	0,235	0,485	1,356	No
d_{90}	0,203	0,451	1,237	No	0,259	0,509	1,447	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

4.6.1. Regresión lineal

Las estadísticas del modelo lineal entre el n de Manning (método de medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan) y los diámetros efectivos, d_i , de la granulometría se muestran en la Tabla 7 y la Tabla 11.

4.6.2. Regresión no lineal

En la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10, se muestran los resultados del análisis estadístico entre el n de Manning (método medición de velocidad y fórmula de Manning) de los modelos: exponencial, potencial y logarítmico respectivamente, con los diámetros efectivos, d_i . Asimismo, en la Tabla 11 y Tabla 12 se muestran los resultados del análisis estadístico entre el n de Manning (método Cowan)

Tabla 8: Análisis estadístico del Modelo Exponencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,788	0,888	4,717	Si	0,886	0,941	6,842	Si
d_{30}	0,736	0,858	4,093	Si	0,929	0,964	8,840	Si
d_{50}	0,810	0,900	5,053	Si	0,875	0,935	6,484	Si
d_{60}	0,745	0,836	4,188	Si	0,777	0,939	4,567	Si
d_{84}	0,213	0,462	1,272	No	0,272	0,522	1,498	No
d_{90}	0,236	0,486	1,362	No	0,286	0,535	1,548	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

Tabla 9: Análisis estadístico del Modelo Potencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,838	0,915	5,577	Si	0,941	0,970	9,809	Si
d_{30}	0,667	0,817	3,469	Si	0,751	0,867	4,259	Si
d_{50}	0,693	0,832	3,676	Si	0,696	0,834	3,710	Si
d_{60}	0,662	0,814	3,427	Si	0,643	0,802	3,284	Si
d_{84}	0,242	0,492	1,385	No	0,296	0,544	1,588	No
d_{90}	0,253	0,503	1,427	No	0,292	0,540	1,573	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

Tabla 10: Análisis estadístico del Modelo Logarítmico entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Método							
	Medición de velocidad (n)				Fórmula de Manning (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,826	0,909	5,330	Si	0,919	0,959	8,267	Si
d_{30}	0,649	0,806	3,327	Si	0,691	0,831	3,660	Si
d_{50}	0,585	0,765	2,908	Si	0,638	0,799	3,250	Si
d_{60}	0,566	0,752	2,795	Si	0,595	0,771	2,968	Si
d_{84}	0,186	0,431	1,169	No	0,254	0,504	1,429	No
d_{90}	0,212	0,460	1,269	No	0,262	0,512	1,459	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

modelo exponencial, y, potencial y logarítmico respectivamente, con los diámetros efectivos d_i .

4.7. Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad

Se seleccionaron los modelos (lineal y no lineal) que muestran mejor grado de asociación y, por tanto, mayor coeficiente de correlación, r ,

para la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning, n , por cada método desarrollado (método de medición de velocidades, ecuación de Manning y Cowan). Los resultados se presentan en la Tabla 13 resaltados con un sombreado. Observando los valores de dicha tabla, se encuentra que para estimar el n de Manning por el método de la medición de velocidades, el modelo lineal

Tabla 11: Análisis estadístico del Modelo Lineal y Exponencial entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Modelo							
	Lineal. Método de Cowan (n)				Exponencial. Método de Cowan (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,483	0,695	2,366	Si	0,434	0,659	2,147	Si
d_{30}	0,630	0,794	3,199	Si	0,598	0,773	2,985	Si
d_{50}	0,484	0,696	2,371	No	0,471	0,686	2,310	No
d_{60}	0,336	0,580	1,744	No	0,330	0,574	1,720	No
d_{84}	0,242	0,492	1,385	No	0,257	0,507	1,442	No
d_{90}	0,272	0,522	1,495	No	0,277	0,526	1,516	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

Tabla 12: Análisis estadístico del Modelo Potencial y Logarítmica entre el coeficiente de rugosidad de Manning y los diámetros efectivos d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{60} , d_{84} y d_{90}

d_d	Modelo							
	Potencial. Método de Cowan (n)				Logarítmico. Método de Cowan (n)			
	R^2	r	t_c	r sig.	R^2	r	t_c	r sig.
d_{10}	0,735	0,857	4,076	Si	0,756	0,869	4,315	Si
d_{30}	0,629	0,793	3,187	Si	0,621	0,788	3,138	Si
d_{50}	0,415	0,644	2,062	No	0,408	0,639	2,031	No
d_{60}	0,247	0,497	1,403	No	0,245	0,495	1,394	No
d_{84}	0,309	0,556	1,638	No	0,292	0,540	1,572	No
d_{90}	0,305	0,552	1,621	No	0,297	0,545	1,593	No

r sig.: correlación significativa, $t_t = 2,447$

arroja el mejor ajuste, con un coeficiente de correlación $r = 0,942$ entre las variables n y el d_{10} ; estableciéndose así el modelo lineal (MLin) dada en la ecuación (23).

$$n = 0,0042(d_{10}) + 0,0278 \quad (23)$$

Para el método de fórmula de Manning, el modelo Potencial posee mejor ajuste entre las variables n y el d_{10} con un coeficiente de correlación, $r = 0,970$. De esta forma se obtiene el modelo potencial (MPot-02) dada en la ecuación (24).

$$n = 0,0429(d_{10})^{0,1371} \quad (24)$$

Para el método de Cowan, el modelo Logarítmico presenta mejor ajuste con un coeficiente de correlación, $r = 0,869$ entre las variables n y el d_{10} . De esta forma se obtiene el modelo logarítmico (MLog) dada por la ecuación (25).

$$n = 0,0058 \ln(d_{10}) + 0,0418 \quad (25)$$

Y, por último, para el método de la medición de la rugosidad se ha obtenido un modelo Potencial (MPot-01) dado en la ecuación (26)

$$n = 0,047(k)^{1/6} \quad (26)$$

Cabe señalar que el modelo MPot-01 está en función de la altura de rugosidad k , en metros, pero relacionándolo mediante análisis estadístico con los diámetros efectivos d_i de la granulometría y contrastando con n obtenidos por fórmula de Manning, se ha encontrado mejor ajuste con el d_{10} (mm), es así que se puede reemplazar el k , por el d_{10} obteniendo así el modelo Potencial (MPot-01) dado en la ecuación (27).

$$n = 0,047(d_{10})^{1/6} \quad (27)$$

4.8. Validación del modelo general

Para validar el modelo general de la investigación, se estiman los n de Manning por los cuatro procedimientos desarrollados y expresados

Tabla 13: Modelos de regresión para cada método de estimación desarrollado

Regresión	Modelo											
	Med. de Vel. (<i>n</i>)				Manning (<i>n</i>)				Cowan (<i>n</i>)			
	R^2	d_i	r	r sig.	R^2	d_i	r	r sig.	R^2	d_i	r	r sig.
Lineal	0,887	d_{10}	0,942	Si	0,930	d_{10}	0,964	Si	0,630	d_{30}	0,794	Si
Exponencial	0,810	d_{50}	0,900	Si	0,928	d_{30}	0,963	Si	0,598	d_{30}	0,773	Si
Potencial	0,838	d_{10}	0,915	Si	0,941	d_{10}	0,970	Si	0,735	d_{10}	0,857	Si
Logarítmica	0,826	d_{10}	0,909	Si	0,919	d_{10}	0,959	Si	0,756	d_{10}	0,869	Si

mediante las ecuaciones (23), (24), (25) y (27) y se contrasta con el n obtenido por el método de la fórmula de Manning (n observados). En la Tabla 14, se presentan los resultados numéricos comparativos de este análisis y en la Figura 3 se muestra los resultados gráficos de los coeficientes de correlación, r , de n de Manning observados y estimados por los modelos encontrados. Así mismo de la Tabla 14, MLin, MPot-01, MPot-02 y MLog son abreviaturas del: modelo lineal, modelo potencial 01, modelo potencial 02 y modelo logarítmico respectivamente.

4.9. Comparativo entre los coeficientes de rugosidad de Manning

La Tabla 15 muestra una comparación de los valores de n de Manning estimados por los métodos de estimación (medición de velocidades, medición de rugosidades, fórmula de Manning y Cowan). Donde se observa que el promedio de n de los cuatro métodos es 0,042 y el coeficiente de variación es 11,37 %, por esta razón se asume el valor de n como representativo para el río Santa en la zona de estudio.

4.10. Discusiones

A partir de los resultados obtenidos, de la Tabla 15, se ha determinado un $n_{\min} = 0,024$, $n_{\max} = 0,069$ y $n_{\text{promedio}} = 0,042$ (considerado como la media de los métodos desarrollados: medición de velocidades, medición de rugosidad, fórmula de Manning y Cowan).

El método de medición de la rugosidad no establece directamente el valor de n , sino que establece una función para calcular n en función de la altura de rugosidad, k . Es así que, entre los métodos antes mencionados, el valor de n de

Manning se encuentra dentro del rango establecido de 0,030 a 0,050 para corrientes de montañas con fondo: grava, piedras y pocos cantos rodados propuesto por Chow [7].

La función obtenida para estimar n de Manning por el método de la medición de la rugosidad, está dado por: $n = 0,047(k)^{(1/6)}$ que viene a ser mayor a la ecuación de $n = 0,0336(k)^{(1/6)}$ obtenido en los grandes ríos de Venezuela [1], y análogo a la ecuación $n = 0,044(k)^{(1/6)}$ obtenido en el río Chonta, distrito de Baños del Inca – Cajamarca [3].

Se observa que en la aplicación del análisis de regresión lineal y no lineal entre el coeficiente de rugosidad n de Manning y los diámetros efectivos d_i , en la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, para los diámetros menores o iguales al diámetro medio d_{50} se obtienen mejor coeficiente de correlación, r , a diferencia de los diámetros mayores que no guardan relación entre las dos variables, López [19].

Del contraste de los modelos, se observa que son dos los modelos de mejor ajuste: MPot-02, con $r = 0,9776$ y MPot-01 con $r = 0,9804$. La estimación de n de Manning mediante el modelo MPot-02 da como resultado un $n_{\text{promedio}} = 0,043$ y la estimación mediante el modelo MPot-01 da como resultado un $n_{\text{promedio}} = 0,048$ (Tabla 14).

Se puede decir que el n medio del MPot-02 se aproxima al n estimado como la media de los métodos de medición de velocidades, fórmula de Manning y Cowan, y el n medio de MPot-01 diverge del n estimado como media de los métodos desarrollados.

Tabla 14: Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (n) observados y estimados

PA	Observados n Manning	Estimados			
		n (MLin)	n (MPot-01)	n (MPot-02)	n (MLog)
PA-01	0,0607	0,0683	0,0686	0,0585	0,0549
PA-02	0,0428	0,0322	0,0475	0,0432	0,0421
PA-03	0,0444	0,0345	0,0508	0,0457	0,0445
PA-04	0,0410	0,0306	0,0438	0,0405	0,0394
PA-05	0,0435	0,0316	0,0462	0,0423	0,0412
PA-06	0,0403	0,0317	0,0465	0,0425	0,0414
PA-07	0,0377	0,0299	0,0418	0,0389	0,0377
PA-08	0,0364	0,0286	0,0360	0,0345	0,0325
Promedio	0,0433	0,0359	0,0476	0,0433	0,0417
Desv. Est.	0,0075	0,0132	0,0095	0,0070	0,0064
Coef Var.	0,1740	0,3676	0,2004	0,1617	0,1540

Tabla 15: Valores del coeficiente de rugosidad n de Manning

Puntos de aforo	Medic. de Vel.	Manning	Cowan	Medic. de Rug.
PA-01	0,0680	0,0607	0,0530	0,0686
PA-02	0,0421	0,0428	0,0430	0,0475
PA-03	0,0324	0,0444	0,0480	0,0508
PA-04	0,0315	0,0410	0,0380	0,0438
PA-05	0,0345	0,0435	0,0380	0,0462
PA-06	0,0276	0,0403	0,0480	0,0465
PA-07	0,0280	0,0377	0,0330	0,0418
PA-08	0,0237	0,0364	0,0330	0,0360
Promedio	0,0360	0,0433	0,0418	0,0476
Desv. Est.	0,0141	0,0075	0,0074	0,0095
Coef. Var.	0,3904	0,1740	0,1780	0,2004

5. Conclusiones

El coeficiente de rugosidad de Manning (n) estimado por el método de medición de velocidades es lineal en función del d_{10} .

El coeficiente de rugosidad de Manning estimado por el método de la fórmula de Manning y por el método de la medición de la rugosidad es potencial en función del d_{10} .

El coeficiente de rugosidad de Manning (n) estimado por el método de Cowan es logarítmico en función del d_{10} .

El modelo que presenta mayor coeficiente de correlación es el modelo potencial y el que presenta menor coeficiente de correlación es el modelo logarítmico.

El coeficiente de rugosidad de Manning adecuado para la zona de estudio es de 0,042.

6. Recomendaciones

Realizar estudios en épocas de lluvias y en más secciones del río Santa y en otros ríos del país. Extraer por cada punto de aforo cinco muestras del material de lecho de río.

Se recomienda sistematizar los cálculos de estimación del n de Manning para su mejor aplicación, así como implementar redes de monitoreo hidrometeorológicos e instalación de estaciones.

7. Referencias

- [1] M. Osío, F. Valencia, E. Guevara, y H. Cartaya di Lena, "Cálculo del coeficiente de rugosidad " n " de manning en los grandes ríos de Venezuela," *Revista Ingeniería UC*, vol. 7, no. 2, pp. 1–2, 2000.
- [2] C. Fernández, A. León, y Y. Rodríguez, "Revista INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL," *Influencia del método de estimación en el coeficiente*

- de Manning para cauces naturales, vol. 39, no. 1, pp. 17–31, 2018.
- [3] N. Burgos, “Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning mediante mediciones de velocidad y profundidad, empleando un molinete hidrométrico, en el río Chonta, Cajamarca, 2016,” Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Cajamarca, 2017.
 - [4] D. Pastora, “Evaluación de la fórmula de Manning en el río Ostua,” Tesis de Maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.
 - [5] G. Colmenárez and J. Pardo, “Estudio de la relación de la rugosidad topográfica obtenida a partir de datos LIDAR y GPS con el coeficiente de rugosidad n de Manning,” *Revista C & G*, vol. 24, no. 1–2, pp. 143–159, 2010.
 - [6] G. Guzmán y T. Vera, “Estudio del intercambio de agua superficial y agua subterránea en el río Cumbe,” Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca, 2013.
 - [7] V. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*. MacGraw Hill Latinoamericana, 2004.
 - [8] R. French, *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill Latinoamericana, 1988.
 - [9] A. Rocha, *Tuberías y Canalizaciones*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2007.
 - [10] C. García y J. Martín, “Caracterización granulométrica del lecho móvil de un río de gravas efímero: Aplicación a un tramo de la riera de Les Arenes,” *Revista Acta Geológica Hispánica*, vol. 36, no. 1–2, pp. 137–147, 2001.
 - [11] L. Crozzoli y R. Batalla, “Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas,” *Revista C & G*, vol. 17, no. 3–4, pp. 29–39, 2003.
 - [12] M. Villón, *Hidrología Estadística*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Agrícola, 2005.
 - [13] C. Díaz, J. Segovia, M. Garduño, y S. Tejeda, “Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 28, no. 1, pp. 73–91, 2012.
 - [14] M. Villón, *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2004.
 - [15] Instituto Privado de Investigación sobre el cambio climático, *Manual de medición de caudales*. Instituto Privado de Investigación sobre el cambio climático, 2017.
 - [16] G. Tapia, J. Molina, G. Pérez, y A. Torres, “Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Reporte Técnico, 2012.
 - [17] J. Gutiérrez, “Cálculo del coeficiente de rugosidad de manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico,” Tesis de Maestría, Universidad de la Salle, 2009.
 - [18] R. Sánchez, “t-Student. Usos y abusos,” *Revista Mexicana de Cardiología*, vol. 26, no. 1, pp. 59–61, 2015.
 - [19] R. López, J. Barragán, y A. Colomer, “Predicción de la resistencia al flujo en ríos de montaña,” *Revista Ingeniería hidráulica en México*, vol. 23, no. 3, pp. 65–76, 2008.

Mathematical model of electrical conductivity as a function of water flow in soils using Flow Net

David Duarte-González * 

Departamento de Matemáticas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

Abstract.- This article studies and discusses the physical-mathematical relationships that govern electrical conductivity and hydrodynamics in porous soils, involved in agricultural irrigation systems and also in grounding systems. For purposes of optimizing irrigation, use of water resources, determination of suitable land for grounding systems and its inherent precision, the parameters of water content in the soil, energy potential of the water, electrical conductivity and, consequently, the general characteristics of the sensors are a fundamental part of this study, since they represent the basic “raw material” for the development of complex irrigation forecasting systems and grounding systems design, to which as the technique advances, more and more variables and methodologies of monitors and control. Initially, the study will analyze the mathematical models that govern both the water content in the soil, and those related to resistivity; then the link between both fields and the different types of sensors for each case are studied. The main motivation of this study is to lay the foundations to initiate more complex description models through computer-assisted numerical methods, additionally with heuristic techniques, thus taking advantage of the computational power available at this time. At the end of the study, a more technical view is obtained about the hydrodynamic processes involved in agriculture and other technologies, due to the low availability of an increasingly scarce and expensive resource such as water.

Keywords: water; irrigation; spat; content; flow; model; agriculture.

Modelo matemático de conductividad eléctrica en función del flujo acuífero en suelos usando mallado de flujos

Resumen.- En este artículo se estudian y discuten las relaciones de orden físico-matemático que rigen la conductividad eléctrica y la hidrodinámica en suelos porosos, involucrada en los sistemas de riego agrícola y también en sistemas de puesta a tierra (SPAT). Para efectos de optimización de riego, uso de recursos hídricos, determinación de terreno adecuado para Sistemas de Puesta a Tierra (SPAT) y su precisión inherente, los parámetros de contenido de agua en el suelo, potencial energético del agua, conductividad eléctrica y, por consecuencia, las características generales de los sensores, son parte fundamental de este estudio, ya que representan la “materia prima” de base para el desarrollo de sistemas complejos de pronóstico de riego y diseño de SPAT, a los que a medida que avanza la técnica, se van agregando cada vez mas variables y metodologías de monitoreo y control. Inicialmente en el estudio se analizarán los modelos matemáticos que rigen tanto el contenido de agua en el suelo, como los relacionados con la resistividad; luego se estudia el enlace entre ambos campos y los distintos tipos de sensores para cada caso. La motivación principal de este estudio es fundamentar las bases para iniciar modelos de descripción mas complejos a través de métodos numéricos asistidos por computador, adicionalmente con técnicas heurísticas, aprovechando así el poder de cómputo disponible en este momento. Al final del estudio se obtiene una visión mas técnica acerca de los procesos hidrodinámicos involucrados en la agricultura y otras tecnologías, debido a la poca disponibilidad de un recurso cada vez mas escaso y costoso como lo es el agua.

Palabras clave: agua; riego; SPAT; contenido; flujo; modelo; agricultura.

Recibido: 26 de octubre, 2020.

Aceptado: 27 de noviembre, 2020.

1. Introducción

Se pronostica que la población mundial sobrepasará los 9 mil millones de habitantes en 2050, lo que supone un problema de grandes dimensiones, en todos los rubros económicos, pero especialmente, para la industria agrícola. En la actualidad, desafíos como las condiciones climáticas extremas y el

* Autor para correspondencia:

Correo-e:deduarte1@uc.edu.ve (D. Duarte-González)

impacto ambiental del desarrollo agrícola, se combaten eficientemente con diversas técnicas desarrolladas desde los últimos años, sin embargo, el hecho de satisfacer la demanda de más alimentos, se presenta como el mayor de los retos que la humanidad haya enfrentado nunca. Para satisfacer estas necesidades, evidentemente crecientes, la agricultura debe recurrir a nuevas tecnologías [1].

El cambio climático (incremento de la temperatura, aumento de dióxido de carbono y variación en la acidez del suelo) supone un impacto, a veces, de grandes proporciones, que ha venido afectando la agricultura y a los procesos de cultivo. Este impacto se refleja en baja productividad y calidad en la mayoría de las cosechas, posiblemente debido a la falta de herramientas adecuadas que permitan al agricultor obtener información precisa y en el momento indicado. No obstante, se ha venido trabajando en tecnologías inalámbricas con dispositivos de monitoreo de variables, cada vez más discretos, y eficientes en el consumo energético, que se encargan de la toma de datos facilitando así las decisiones para mejorar los procesos de cultivos y cosecha. Todo esto se resume a incrementar la eficiencia del proceso agrícola, siempre y cuando se lleve a cabo un efectivo monitoreo en tiempo real [1].

La efectividad de los cultivos depende del conocimiento del estado de los mismos y de la vigilancia sobre los parámetros ambientales más importantes como son: la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y otros parámetros que comprometen su rendimiento [2]. El monitoreo, y por consecuencia, la eficiencia y precisión de los sistemas de riego, dentro de los parámetros asociados a los sistemas de siembra, siempre han sido de vital interés para los investigadores y desarrolladores de soluciones en este ámbito. Son diversas las variables a considerar en un contexto de riego de precisión, y muchas dependen de cada tipo de cultivo, tipos de suelos y condiciones ambientales.

El tipo de suelo, composición química, estratificación y compactación del material son propiedades inherentes de la formación geológica del suelo en un sitio determinado; aunque no permanecen constantes, su variación depende de

cambios a largo plazo [3].

Las nuevas aplicaciones de agricultura inteligente basadas en el monitoreo, en las redes de sensores inalámbricos, *Cloud Computing* y las tecnologías de Internet de las Cosas, permitirán a la industria agrícola reducir el gasto innecesario de fertilizantes y, principalmente, del agua en los sistemas de riego [4].

En los países desarrollados se elaboran Bases de Datos con parámetros que permiten estudiar diversas variables, tanto climáticas como hidrológicas, a partir de las cuales se hace posible la validación de datos provenientes de simulaciones, y de esta manera hacer los modelos más fidedignos logrando que se puedan realizar futuras proyecciones. Sin embargo, esta validación podría ser especialmente complicada en lo referente a humedad del suelo debido a la dificultad que entraña la obtención de datos observacionales en esta variable. Además, distintas bases de datos expresan la humedad del suelo de forma diferente, por ejemplo, como volumen de agua en un volumen de suelo o como capa de agua equivalente. Por ello, los datos de humedad del suelo no siempre son fácilmente comparables [5].

Por otro lado, se sabe que el suelo está formado por materias en estado sólido, líquido y gaseoso. La materia en estado sólido la componen los diferentes minerales que contiene el suelo y algunos compuestos orgánicos. La materia en estado líquido corresponde al agua con diferentes tipos de sales disueltas. El aire y el vapor de agua constituyen la materia en estado gaseoso. La interacción de estas diferentes sustancias en sus diferentes fases hace que el comportamiento del suelo sea complejo, en la Figura 1 se observa el modelo aproximado de composición volumétrica del suelo de textura media [6].

1.1. Fundamentación

1.1.1. Determinación de la humedad en el suelo basado en tierra

En el reporte técnico de Li *et al.* se revisa el estado del arte de los métodos basados en tierra para la caracterización de la dinámica espacio-temporal del agua contenida en el suelo a escala de campo. En este trabajo discuten los métodos



Figura 1: Representación esquemática por volumen de un suelo de textura media [6]

puntuales, enfoques hidrogeofísicos, radiometría de banda L, inducción electromagnética, medición de resistividad, sondas, etc. Se estudian sus principios básicos y los desarrollos recientes en el procesamiento de datos [7].

1.1.2. Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad

En el trabajo de Gómez *et al.* los autores proponen un sistema de riego autónomo compuesto de un esquema de aspersión, con el menor número de elementos para mayor cubrimiento de área, el cual se acciona automáticamente a partir de la medición de temperatura ambiente y humedad del suelo. La fundamentación de este trabajo estuvo en la implementación de un sistema modular con la posibilidad de añadir más variables, validándolo en un cultivo de maíz durante seis meses, distribuyendo equitativamente seis grupos de sensores, humedad y temperatura, en el área destinada para el cultivo; se diseñó para que los sensores interactuaran con los 6 aspersores, también dispuestos para tal fin, estos aspersores son 70-10-30G que cubren 20 m de diámetro a 72 psi cada uno, accionados por un microcontrolador. Los resultados arrojan mejoras físicas en los cultivos con menor consumo de agua, en comparación al suministro permanente con

manguera, estableciendo así mejores condiciones de calidad, mediante un sistema sencillo y de bajo costo, cuya recuperación de inversión se obtiene en un tiempo de dos a tres cosechas [8].

1.1.3. Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos

En el modelo numérico para flujos en un medio poroso, establecido por Duran *et al.* se empleó un método numérico para resolver las ecuaciones de Darcy en la determinación de flujos de agua en un medio poroso. A través de la Ley de Darcy se evaluó el gradiente de presión versus caudal, diámetro y velocidad. Los autores utilizaron un permeámetro para comparar los resultados obtenidos. El modelo numérico fue utilizado para variar la geometría del permeámetro y determinar las condiciones óptimas de su funcionamiento [9].

En este artículo se tratará, como primer paso, los aspectos físicos-matemáticos del perfil de agua existente en los suelos destinados para sistemas agrícolas y su correlación con la conductividad eléctrica característica. Luego se establecerá un modelo basado en flujo planimétrico vertical para analizar el comportamiento de la conductividad eléctrica del suelo, y la irrigación del agua en el mismo.

Para establecer la relación físico-matemática entre dos parámetros de naturaleza distinta como lo son la conductividad eléctrica y la cantidad de humedad que posee un material, en este caso, el suelo para agricultura, se aprovecharán los aspectos matemáticos que posee la hidrodinámica existente en los suelos para agricultura la cual también tiene aspectos espacio-temporales que definen, de igual manera, el comportamiento eléctrico del mismo.

En el modelo propuesto se plantea la Ley de Darcy, desde un punto de vista de la dinámica conductiva eléctrica del suelo para tener un panorama amplio acerca de la materia prima necesaria para un sistema de riego de precisión.

1.2. Delimitación

Con esta investigación se pretende establecer un estudio minucioso general de la presencia de agua en el suelo, con la intención de establecer la

relación directa o indirecta entre la conductividad eléctrica del suelo y el potencial de agua y/o humedad en el mismo. La motivación esencial es que la presencia de agua en el suelo es la variable principal y determinante para todo sistema de riego de precisión.

Los datos requeridos son:

- Conductividad y resistividad eléctrica del suelo.
- Contenido de agua en el suelo.
- Potencial de agua en el suelo.
- Características generales de los sensores.

2. Conceptualización

2.1. Conductividad y Resistividad eléctrica del suelo

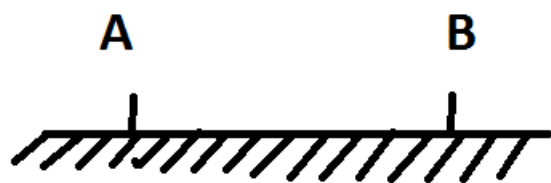


Figura 2: Medición de resistencia en dos puntos separados del suelo

Partiendo del principio que todos los materiales poseen resistividad, desde el punto de vista físico y basados en la Ley de Faraday en su forma integral (Segunda Ecuación de Maxwell) se tiene la ecuación (1) [10].

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = u, \quad (1)$$

donde $\vec{E}$ es el vector intensidad de campo eléctrico, y el diferencial se calcula en función de la longitud del conductor, en este caso, por tratarse de un suelo, debemos tomar en cuenta el segmento distancia mínima entre los puntos A y B de acuerdo con la Figura 2, y por la Ley de Ohm en su forma vectorial según la ecuación (2) [10].

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \cdot \vec{j}_c, \quad (2)$$

donde σ es la conductividad del suelo.

Siendo u la tensión existente en dos puntos distintos (A y B) de la superficie del suelo. Hipotéticamente la corriente i_c permanece constante a través del segmento distancia mínima entre los puntos A y B, $\overline{AB}$, entonces podemos considerarla proporcional a la circulación de $\frac{1}{\sigma} \vec{j}_c$, representándose así el efecto resistivo según la ecuación (3) [10].

$$\frac{\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l}}{i_c} = R \quad (3)$$

y sabiendo el comportamiento de la ecuación (4)

$$i_c = \int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Siendo S la sección transversal del material, entre los puntos A y B, queda la expresión de la resistencia como se muestra en la ecuación (5) [10].

$$R = \frac{\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l}}{\int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S}} \quad (5)$$

Tomando en consideración las ecuaciones (6) y (7) y sustituyéndolas en (5) se obtiene la ecuación (8).

$$\oint_l \frac{1}{\sigma} \vec{j}_c \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\sigma} j_c \cdot l \quad (6)$$

$$\int_S \vec{j}_c \cdot d\vec{S} = j_c \cdot S \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S} \quad (8)$$

Se puede denominar la resistividad característica del suelo ρ , según la ecuación (9) [10]:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

Quedando la resistencia expresada según la ecuación (10):

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (10)$$

De la ecuación (10) y teniendo en cuenta la ecuación (11)

$$EC_e = S, \quad (11)$$

se desprende la expresión de la conductividad eléctrica EC_e según la ecuación (12).

$$EC_e = \rho \frac{1}{R} \quad (12)$$

2.2. Contenido de agua en el suelo

Los dos parámetros mas importantes que describen el estado de la presencia del agua en el suelo son, contenido de agua y potencial total del agua.

El contenido del agua se refiere a la fracción del suelo que está ocupada por agua y puede ser medida en masa-por-volumen.

El potencial total del agua se refiere a la energía del agua en el suelo y generalmente incluye potencial matricial (llamado, con frecuencia, potencial capilar o potencial de humedad), potencial gravitacional debido a la elevación, y potencial osmótico debido a la salinidad presente.

El contenido del agua se puede calcular gravimétricamente o volumétricamente. El contenido gravimétrico de agua es la masa de agua dividida entre la masa de suelo sólido. Se puede medir pesando una masa de suelo sólido secándolo durante 24 horas a 105 °C y repesando la muestra, según la ecuación (13).

$$\theta_{grav} = \frac{m_{agua}}{m_{suelo_seco}} \quad (13)$$

Y la masa de agua la podemos calcular, de acuerdo a la ecuación (14):

$$m_{agua} = m_{suelo_humedo} - m_{suelo_seco} \quad (14)$$

Donde θ_{grav} es el contenido gravimétrico de agua, (g/g); m_{agua} es la masa de agua, (g), y m_{suelo_seco} es la masa de suelo seco (g).

2.3. Potencial de agua en el suelo

El potencial químico (osmótico), la elevación (gravitación) y el potencial hidráulico matricial (capilar), son todos los componentes del potencial total H , del agua en los suelos. La energía térmica también puede influir en la dirección del flujo de agua, aunque no está incluida en esta investigación.

El potencial osmótico es causado por el hecho de que el agua que tiene alta concentración de sales posee una energía mas baja (más negativa) que el agua con menor concentración de sales. Así, el agua es conducida hacia las zonas de mayor salinidad, o, se le impide fluir de dichas zonas. De modo tal que si la salinidad es alta en el suelo, a las plantas se les dificulta obtener agua de este. La energía potencial osmótica en suelos saturados se puede calcular a través de la ecuación (15).

$$\phi_s = -3,6 \cdot EC_e, \quad (15)$$

donde EC_e es la conductividad eléctrica de la pasta saturada extraída, expresada en dS/m , y ϕ_s es el potencial osmótico.

A medida que el suelo se seca, la salinidad se incrementa. El potencial osmótico, como función del contenido de agua está expresado de acuerdo a la ecuación (16).

$$\phi_s = -3,6 \cdot EC_e \cdot \theta_{sat}/\theta = -3,6 \cdot \theta_{sat}/R \cdot \theta \quad (16)$$

En cuanto a la energía cinética, ésta es despreciable debido a que la velocidad del agua es extremadamente pequeña en los suelos. Por lo tanto, el potencial total de agua en los suelos se expresa según la ecuación (17).

$$H = \frac{P}{\alpha g} + Z + \phi_s \quad (17)$$

Donde P es la presión (Pa), α es la densidad del agua (kg/m^3), g es la gravedad ($9,82 m/s^2$), Z es la elevación sobre el nivel del mar (m) y ϕ_s es el potencial osmótico, (m). [11]

2.4. Características generales de los sensores aplicados en la detección de cantidad de agua en los suelos

Una de las ventajas principales de los sensores de humedad del suelo es que miden los cambios

de humedad, antes que los cultivos comiencen a sufrir estrés por falta de humedad. En cuanto a las desventajas está en que deben ser dispuestos físicamente en el suelo, monitoreados y, posiblemente, removidos durante el proceso de cosecha. Otra desventaja es que muchos proveen estimaciones imprecisas del estado de la humedad en los suelos debido al muestreo de pequeño volumen al que tienen acceso, o en todo caso, a la ineficiente instalación.

Existen los tensiómetros, que tienen una copa cerámica porosa contenida en el suelo, y directamente miden el potencial de agua en este. A veces están conectadas directamente a los aspersores para controlar automáticamente el inicio del riego.

También están los que miden la resistencia eléctrica, la cual está inversamente relacionada con la humedad del suelo. Los dispositivos de resistencia eléctrica más comunes son bloques de yeso con electrodos dentro de los mismos. Las desventajas de los bloques de yeso incluyen respuestas lentas a cambios en el contenido de agua del suelo, sensibilidad al suelo a la salinidad, degradación química, posible daño por equipos de campo e insensibilidad a los potenciales de humedad del suelo a menos de 1 bar [11].

2.4.1. Sensores de humedad de tipo capacitivo

Los sensores de humedad basados en capacitancia poseen dos electrodos que funcionan como un condensador y el suelo circundante hace las veces de material dieléctrico que almacena la carga. Existen en el mercado sensores de humedad del suelo de bajo costo, como el WaterScout SM100, de Spectrum Technologies (Figura 3) el cual se trata de un sensor activo con una precisión de 3 %; este sensor tiene la capacidad de medir la conductividad eléctrica del suelo y la temperatura también [12].

2.4.2. Sensores de humedad de tipo resistivo

Los sensores de tipo resistivo poseen dos puntas de prueba que funcionan como resistencias variables en función de la humedad del suelo como se muestra en la Figura 4. El rango de medición de estos sensores va de 0 a 100 del Contenido Volumétrico del Agua, teniendo una precisión de

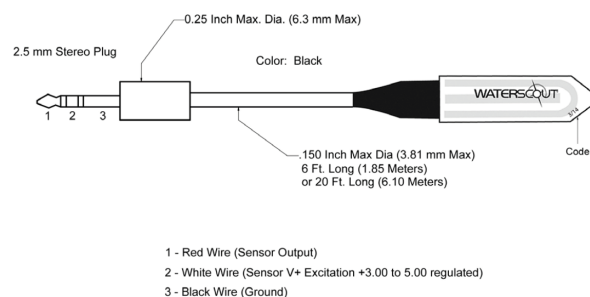


Figura 3: Esquema físico del Sensor SM100 de WaterScout. Fuente: Spectrum Technologies <https://www.specmeters.com/>

-0,5 y, tal vez, su característica mas notoria es su bajo costo lo cual lo hace una buena solución para la variable de la humedad del suelo en la agricultura. Estos sensores se caracterizan por su bajo consumo en el orden de los miliamperios (mA) [13].

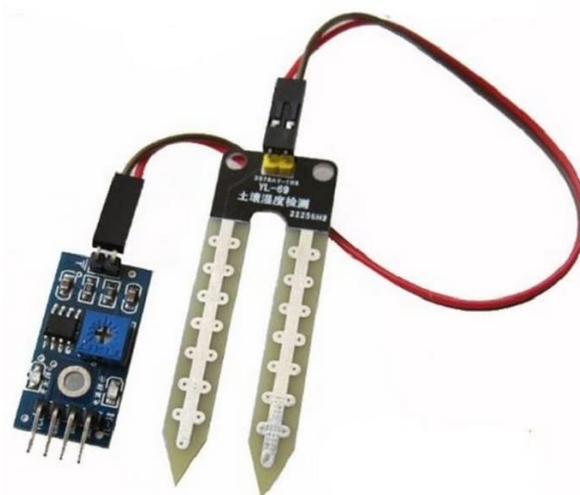


Figura 4: Sensor de tipo resistivo YL69. Fuente: <https://www.amazon.com/>

2.4.3. Sensores para medición de impedancia

Los sensores basados en impedancia responden a los cambios de humedad, midiendo los cambios en su constante dieléctrica aparente como el mostrado en la Figura 5. Una señal sinusoidal de 100 MHz se aplica a una línea de transmisión interna que se extiende hacia el suelo por medio de una cabeza sensor. Los sensores de impedancia pueden tener una precisión de 1 %, error de salinidad de 3,5 % considerando que se trata de una medición bastante sensible [12].



Figura 5: Sensor de humedad del suelo basado en impedancia, ML3 ThetaProbe.

Fuente: Delta T. <https://www.delta-t.co.uk/>

3. Modelo de irrigación y flujo de agua propuesto

3.1. Flujo del agua en suelo

3.1.1. Flujo en plano vertical

Para este análisis vamos a asumir que el flujo de agua está limitado a planos verticales; estableciendo un sistema de coordenadas con ejes X y Z . Sabiendo que el eje Z representa la dirección hacia arriba (vertical), o en otras palabras, la gravedad se supone que actúa en el sentido negativo de Z . En este caso vale destacar las dos componentes relevantes de la Ley de Darcy, a continuación en las ecuaciones (18) y (19).

$$q_x = -k \frac{\partial H}{\partial x}, \quad (18)$$

$$q_z = -k \frac{\partial H}{\partial z} \quad (19)$$

Tomando en cuenta que la conservación de la masa exige que el agua no se puede perder o ganar desde un pequeño elemento, teniendo dimensiones diferenciales dx y dz , se resume a la Figura 6.

Como se puede observar, la diferencia entre el flujo de salida del elemento en el lado derecho y el flujo de entrada al elemento en el lado izquierdo

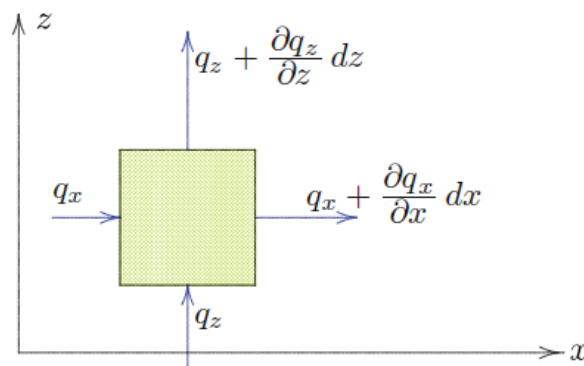


Figura 6: Efecto de la conservación de masa [14]

está la descarga. Del mismo modo, se observa el flujo por encima del elemento y debajo del elemento es la descarga vertical respecto al eje Z .

Es indudable que la suma de estas dos cantidades debe ser igual a cero, tal como se muestra en la ecuación (20):

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones parciales (18) y (19) en (20), se obtiene la siguiente ecuación (21):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (21)$$

Esta ecuación, matemáticamente se denomina *Ecuación de Laplace*, esta ecuación diferencial rige, junto con las condiciones de contorno, el flujo de agua subterránea en un plano, si el medio poroso es isotrópico y homogéneo, y si la densidad del fluido es constante. También se ha asumido que no se puede almacenar agua. La ausencia de almacenamiento es válida sólo si el suelo no se deforma y está completamente saturado.

El potencial de agua depende de la conductividad eléctrica del suelo, como variable única, ya que podemos asumir que tanto la presión, como la densidad del agua son constantes, en este caso, sustituyendo, la *Ecuación de Laplace* quedaría como se indica en la ecuación (22) [14]:

$$\frac{\partial^2 EC_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 EC_e}{\partial z^2} = 0 \quad (22)$$

3.2. Red de Flujo eléctrico (Flow-Net)

Por el principio de conservación de la carga, donde ésta ni se crea ni se destruye, se sabe que si en una superficie cerrada, la carga está disminuyendo, entonces hay un flujo de corriente neto hacia otra superficie del sistema.

Dado que la capacidad de conductividad eléctrica es linealmente dependiente del potencial de agua subterránea, y ésta a su vez es linealmente dependiente del flujo de agua en un plano vertical, entonces podemos definir que la variabilidad de la conductividad eléctrica del suelo está dada por las ecuaciones (23) y (24):

$$q_z = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (23)$$

$$q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (24)$$

Sustituyendo las ecuaciones (23) y (24) en la ecuación (20), se obtiene la ecuación:

$$-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial x} = 0 \quad (25)$$

Se puede observar que el flujo está precisamente en la dirección X si el valor de Φ es constante en esta dirección. Observe que la condición $q_z = 0$ si $\partial \Phi / \partial x = 0$. De manera similar, el flujo está en la dirección Z solo si es constante en dirección Z , porque se deduce que $q_x = 0$ si $\partial \Phi / \partial z = 0$.

Formalmente, esta propiedad se comprueba en la base del **diferencial total** según la ecuación (26).

$$d\Phi = \frac{\partial \Phi}{\partial x} dx + \frac{\partial \Phi}{\partial z} dz = q_z dx - q_x dz \quad (26)$$

De aquí podemos observar que $q_z/q_x = dz/dx$ es la dirección del flujo, por tanto $d\Phi = 0$. Concluyendo de esta manera que en una malla de líneas de potencial, el valor del flujo Φ es constante a lo largo de las líneas de corriente.

En términos generales, se puede plantear la ecuación (27).

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta x} = \frac{\Delta EC_e}{\Delta z} \quad (27)$$

Si se elige un intervalo donde hacemos $\Delta \Phi = \Delta EC_e$ entonces $\Delta x = \Delta z$ generando así un pequeño

cuadrado diferencial como se aprecia en la Figura 7, siendo ésta una propiedad general de la Red de Flujos (Flow-Net).

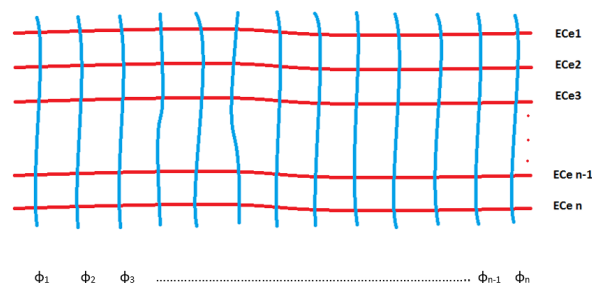


Figura 7: Líneas de flujo vs líneas de potencial expresado en capacidad de conductividad eléctrica

Un modelo físico que nos permita experimentar con los diferenciales de flujo en función de la conductividad eléctrica del suelo, dadas las composiciones de sus capas respectivas, se puede representar de esta manera, donde los elementos de los electrodos conforman una malla de líneas de flujo y líneas de potencial como se muestra en la Figura 8.

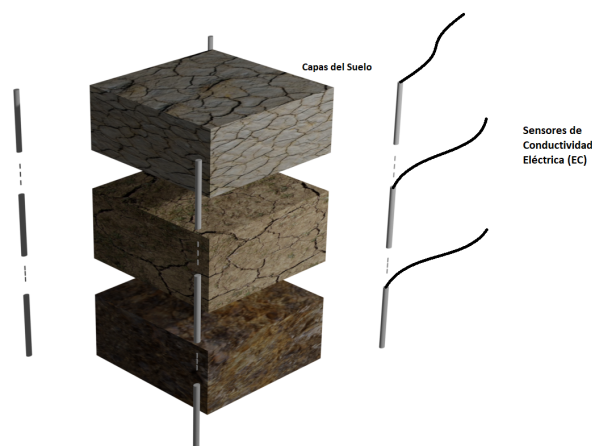


Figura 8: Representación artística en 3D de un sistema de detección de flujo en función de la conductividad eléctrica del suelo en sus diversas capas

4. Consideraciones finales

Como puede apreciarse, la relación entre el potencial de agua en el suelo y su conductividad

eléctrica es la base fundamental para el diseño de sistemas predictivos y sensores económicos para determinar, con una buena precisión, la cantidad de agua contenida en el suelo.

Según la ecuación (26), se establece matemáticamente la relación existente entre el flujo de agua en un suelo poroso y su conductividad eléctrica en un modelo planimétrico vertical.

5. Conclusiones

En este trabajo se logró conseguir la expresión matemática que permite establecer la relación entre los parámetros de conductividad eléctrica y flujo de agua en un suelo poroso a través de la ecuación de derivadas parciales de Laplace y la Ley de Darcy, que describe la dinámica del agua. Dependiendo de la cantidad de intervalos elegidos para poner en marcha la Red de Flujos Eléctricos, dependerá el diseño del sensor acondicionado para tal fin, de modo que el monitoreo sea lo más fidedigno posible.

La validación de este modelo teórico debe constar de tres pasos:

- Establecer un algoritmo basado en elementos finitos para la resolución de la Ecuación de Laplace en función de la conductividad eléctrica del suelo.
- Diseñar un sensor de medición de conductividad eléctrica, directa o indirectamente, adaptado al método finito propuesto.
- Comparar con los métodos prácticos pre-existentes y verificar su funcionalidad vs economía de los recursos hídricos.

Es evidente que los métodos de cálculo del contenido de agua y/o potencial en un suelo, bien sea poroso, o de cualquier otra índole, basados en la obtención previa de su conductividad eléctrica, están sujetos a que los cambios importantes de valores, no sean detectados en un tiempo prudencial, influyendo así en la toma de decisiones, sin previamente haber hecho una predicción automática, dadas las condiciones de contorno del sistema, por tanto se hace necesario obtener un

algoritmo preciso, y de preferencia, autónomo, para lograr una alta eficiencia que reduzca los costos y aumente la productividad en el proceso de riego.

Para esto se recomienda un software que tome en cuenta las variables y cálculos propuestos en este trabajo y combinado con un método numérico finito y redes neuronales para lograr tal fin.

6. Referencias

- [1] S. I. Duquea, "Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos," *Revista Vector*, pp. 51–60, 2017.
- [2] L. Romero Amondaray, F. M. Piña Figueredo, y M. M. Goire Castilla, "Red de sensores inalámbricos para las casas de cultivos protegidos san José," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, no. 1, pp. 16–26, 2018.
- [3] J. Briceño, "Manual para la medición de resistividad del suelo," *Universidad de Los Andes*, vol. 1, no. 1, 2015.
- [4] F. Jonard, H. Bogen, D. Caterina, and S. Garre, "Ground-based soil moisture determination," *Observation and Measurement*, Springer, vol. 1, no. 2, 2018.
- [5] E. Romero Jiménez, M. García-Valdecasas Ojeda, P. Yeste Donaire, S. R. Gázmiz-Fortis, Y. Castro-Díez, y M. J. Esteban-Parra, "Estudio comparativo de distintas Bases de Datos de humedad del suelo superficial en la Península Ibérica," in *XI Congreso AEC (Asociación Española de Climatología)*, Cartagena, España, 2018.
- [6] J. C. Arcioni y J. F. Giménez, "La ionización de los suelos y las corrientes de los rayos a tierra," *Ingeniería Eléctrica* 357, Reporte Técnico, 2020.
- [7] X. Li, A. Klotzsche, D. Caterina, S. Garré, M. Schwank, H. Bogen, H. Vereecken, A. Moneris, F. Jonard, and C. von Hebel, "Ground-based soil moisture determination," *Agrosphäre*, Tech. Rep., 2019.
- [8] P. F. Gómez, J. O. Gómez, y G. E. Serrano, "Sistema de riego autónomo para pequeños cultivos basado en medición de temperatura y humedad," *Revista Politécnica*, vol. 13, no. 25, pp. 65–74, 2017.
- [9] M. Duran-Pinzón, J. Páez-Arango, y P. J. García-Guarín, "Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos," *Iteckne*, vol. 15, no. 1, pp. 24–33, 2018.
- [10] G. García Talavera, *Análisis Fisicomatemático de Redes Eléctricas*. Editorial Limusa, 1998.
- [11] P. Waller and M. Yitayew, *Irrigation and drainage engineering*. Springer, 2016.
- [12] S. Adla, N. K. Rai, H. Sri Karumanchi, S. Tripathi, M. Disse, and S. Pande, "Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 363, 2020.

- [13] N. Sandoval and J. Gomez, “Desarrollo de una aplicación web para registrar la temperatura y humedad del suelo, obtenidos por una red de sensores inalámbricos, utilizando el estándar IEEE 802.15. 4,” *Semilleros de Investigación*, vol. 1, no. 1, 2018.
- [14] A. Verruijt, *An Introduction to Soil Mechanics*. Springer, 2018, vol. 30.

An assessment of development level of villages in Lorestan province using numerical taxonomy method

Maryam Hasanvandian , Alireza Poursaeed* , Roya Eshraghi Samani ,
Hamed Chaharsoughi Amin 

Department of Agricultural Extension and Education, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran.

Abstract.- In today's society, achieving development and reducing regional inequalities is one of the most important challenges facing governments. The role and position of villages in the process of economic, social and political development on a local, regional and national scale and the consequences of underdevelopment of rural areas such as widespread poverty, growing inequality, rapid population growth, unemployment, migration, and urban marginalization has attracted attention to rural development, and many experts believe that the cause of urban problems in developing countries is underdevelopment of rural areas. In the current research, in order to determine the degree of development of villages in Lorestan province, various economic, social and cultural sectors were considered and their ranking based on the development level using numerical taxonomic analysis method has been done. To do this, we using the latest statistics and information related to 2016, and 101 variables in the form of 8 indicators (educational, demographic, infrastructure, economical, health, service, cultural, welfare and agricultural performance) have been evaluated. According to our results, it was observed that the distribution of facilities and services in the villages of Lorestan province is unbalanced, as out of 87 villages of Lorestan province, four villages were identified as heterogeneous areas and Bazvand village has a development coefficient of 0,765 as a most provided village in this province. The rest of the villages in Lorestan province are being deprived as semi-provided and deprived villages. In conclusion, it has been said that most of the villages in this province need proper management and planning to develop and increase facilities and services.

Keywords: Lorestan Province; numerical taxonomy; development indicators.

Evaluación del nivel de desarrollo de las aldeas en la provincia de Lorestan utilizando el método de taxonomía numérica

Resumen.- En la sociedad actual, lograr el desarrollo y reducir las desigualdades regionales es uno de los desafíos más importantes que enfrentan los gobiernos. El papel y la posición de las aldeas en el proceso de desarrollo económico, social y político a escala local, regional y nacional y las consecuencias del subdesarrollo de las zonas rurales, como la pobreza generalizada, la creciente desigualdad, el rápido crecimiento de la población, el desempleo, la migración y la marginación ha atraído la atención sobre el desarrollo rural, y muchos expertos creen que la causa de los problemas urbanos en los países en desarrollo es el subdesarrollo de las zonas rurales. En la presente investigación, se determinó el grado de desarrollo de las provincias de Lorestan, considerando sectores económicos, sociales y culturales y se realizó su clasificación en función del nivel de desarrollo mediante el método de análisis taxonómico numérico. Para ello, utilizamos las últimas estadísticas e información relacionada con 2016, y se han evaluado 101 variables en forma de 8 indicadores (educativo, demográfico, infraestructura, económico, salud, servicios, cultural, bienestar y desempeño agrícola). Se observó que la distribución de instalaciones y servicios en las aldeas de la provincia de Lorestan está desequilibrada, ya que de 87 aldeas de la provincia cuatro fueron identificadas como áreas heterogéneas y la aldea de Bazvand tiene un coeficiente de desarrollo de num 0,765 como pueblo más provisto en esta provincia. El resto de las aldeas de la provincia de Lorestan están siendo identificadas como aldeas semi-provistas y desfavorecidas. En conclusión, la mayoría de las aldeas de esta provincia necesitan una gestión y planificación adecuadas para desarrollar y aumentar las instalaciones y los servicios.

Palabras clave: Provincia de Lorestan; taxonomía numérica; indicadores de desarrollo.

Received: September 08, 2020.

Accepted: November 19, 2020.

*Correspondence author:

e-mail: a_poursaeed@yahoo.com (A. Poursaeed)

1. Introduction

Today, rapid growth of the urban population in the last few decades, is one of the most important aspects of global change [1], and the lack of financial, technical, and infrastructure facilities to create public and social uses of the city has created a heterogeneity and imbalance in the distribution of various facilities in the city. Also, rapid population growth has provided the prelude to extensive urban growth and development, and has brought about extensive changes from local to global scales in land use [2], as it can be said, the population of cities has increased, but the services that supply their different needs are not suitable for the citizens [3]. According to the UN program in recent years, the main issues of human development have been various. In this regard, among the key axes in drawing and achieving human development, we can mention the following: emphasis on financing and human development, the effects of global dimensions of human development and people's participation, human security, gender and human development, economic growth, human rights, etc [4]. Promoting human development depends on the capacity to acquire knowledge, access to the material possibilities of life, and enjoy a long and healthy life [5], and education and health centers also create social benefits, which is one of the factors influencing the human development index [6].

Hereof, inequality and its various dimensions are important signs of underdevelopment because regional inequalities in all their forms and levels can have dire consequences [7]. At the regional level, creating a logical balanced among people, employment and services is one of the most desirable ideals, and in recent years many governments and decision-makers have been trying to reduce the severity of regional inequalities [8]. Therefore, achieving the development and decrease of regional inequalities is one of the most important challenges for governments in today's society. The history of development is very vast and dates back to the time of natural and social changes on the planet. From a natural view point, the history of development coincides with

the evolution of geology and from a social view point is equal to the emergence of primitive human societies [9]. The prevalence of today's concept of development that is mostly relative, dates back to the 1960s, and before that, concepts such as reclamation (colonization), reform, development, improvement, promotion, and ultimately growth over the past years were discussed.

On the other hand, with the expansion of urbanization and the rapid growth of industry and technology in the world, the backwardness of rural areas of the world became more than ever visible, because villagers had lower incomes than urban dwellers and had little social, welfare, and educational services, hence they contributed little to growth and development [10]. The reasons for this were: the geographical dispersal of the villages, the lack of economic efficiency to provide social, professional and specialized services, the lack of agricultural job (lack of productivity), limited land resources (as opposed to population growth), and lack of proper management of managers.

The foundation for all the problems of backwardness in rural areas were found to be a widespread poverty, growing inequality, rapid population growth and growing unemployment [11]. For this reason, rural development was born to alleviate the extreme poverty of rural areas, improve the living standards and rural life quality, create employment and increase their productivity. Rural development is a multidimensional concept with different economic, social, and cultural dimensions, and one of these dimensions, due to their influence on the rural environment, is of great significance, which has caused the rural sector to always be considered [12].

1.1. Background and theoretical foundations of research

Literature reviews showed that there have been done many studies on the development and leveling techniques that can be mentioned below:

In [13], the authors try to use the indicators selected by the defined objectives, the TOPSIS and VIKOR methods to study sustainable development. The results may be advised to choose the

appropriate method to be used in similar studies. Amanpour [14] in a study titled Regional Analysis and Rural Development Assessment acknowledged that in the planning process, in order to achieve sustainable development and maintain it, all the necessary conditions of human societies and their needs must be considered. In this regard, despite Extensive studies have been conducted in Iran before, but not all aspects of development, especially rural development indicators, have been considered.

Dev [15] in his paper on the study of inequalities using the geographical distribution of income, examines spatial inequalities using geographic data, the findings show that the level of inequality between white and black neighborhoods is very acute.

Piketty & Saze [16], in a study on long-term inequality, explores and provides basic facts about the long-term evolution of income and wealth inequalities in Europe and the United States. It has been from Europe and now there is more inequality in America than in Europe. They acknowledge that it is possible for us to discuss this, but it is a lesson for the future.

Oliveira [17] in a study titled “A multivariate methodology to uncover regional disparities: A contribution to improve European Union and governmental decisions” using factor analysis to identify regional inequalities in 1991 and 1995 in Portugal. Leshar [18] in a research entitled “Analysis of the economics of investment provisions in regional trade agreements” have ranked developed and developing countries and classified them into different categories.

Molnar [19] by conducting a study titled “Factor influencing development level of settlements in South-Transdanubia”, development level of the settlements of this region in terms of 17 socio-economic and infrastructural social indicators for the years 2000 to 2004 has been determined using the combined development index method. Al-Hassan [20] studied on regional disparities in Ghana during 1990 to 2000. The results showed that economic growth during the period led to a reduction in general poverty in Ghana, but since this growth was mainly due to agricultural exports,

gap between the development of the northern regions and the southern regions has widened, because they have not been able to compete in agriculture.

Rosentstein [21] investigated cultural development and city neighborhoods. The results of this study demonstrate four characteristics of cultural development policy and argue the impact of these characteristics on cultural development and cultural life of neighborhoods. Jakub and Marcela [22] in a study titled “Factors affecting development of rural Areas in the Czech Republic: a literature review”, to detect effective indicators, 14 most frequently used indicators were identified based on the comprehensive analysis of the chosen Czech studies.

Summarizing the research conducted in Iran and outside the country shows that researchers have used different techniques and methods to measure development degree of regions and recognize and analyze inequalities and regional differences, and each of these methods has its advantages and disadvantages. Among the methods of measuring the level of development, multi-attribute decision-making (MADM) techniques have more application and generality. Therefore, the current research aims to investigate the inequalities between the villages of Lorestan province in terms of the level of development indicators using numerical taxonomic technique.

Nowadays, the issue of development is a concern for many countries, but there is no an equal definition for the development of which there is a universal agreement. Development is considered as a fundamental change in economic, social, and cultural variables in any society, and its realization requires the creation of harmony among its various dimensions. In general, development is a comprehensive process of economic, social, cultural and political activities that aim to continuously improve the lives of the population and its activities, freedom, participation and fair distribution of interests are among its basic bases [23]. In this regard, Charles Kindle Berger says: "In general, the term development implies a change in how production is done, as well as a revision in the allocation of resources and labor to different

sectors of production". But Miradell believes that development as the movement of a one-handed social system forward. Hodder [24] believes that given that the main goal of development is to eliminate all social inequalities, the most appropriate concept for development is growth along with social justice.

1.2. *The importance and necessity of research*

Basically, rural areas, as a rule of the settlement system and national activity, play an important role in national development, because the sustainable development of the land depends on the stability of the rural system as a subset of the land system, and the sustainability of rural spaces in different dimensions can play an effective function in regional and national development. Unfortunately, the evidence and experience show that the right and duty to develop rural communities and spaces, in proportion to its share, position and function in the national economy, has been ignored and rural areas in completely unequal situation to access opportunities and benefits from growth. Thereto, adjusting the socio-economic and territorial imbalances in order to develop rural communities and facilitate the growth and development of these communities is an essential and inevitable necessity [25]. The development of a rural area should be designed within the general framework of national policies [26]. Rural development is a dynamic process, dealing mainly with rural areas, and includes a number of factors, including agricultural growth, economic and social infrastructure, fair wages for housing and housing for landless people, rural planning, general health, education and literacy, communication, etc. Achieving development depends on various factors and conditions that should be put together to reach development aims. Experience of development in third world countries (i.e., countries mostly in Asia and Africa), at least in the rural sector, shows that the attitude towards development and the role of indigenous culture and the methods and strategies adopted play a key role in the success or failure of development programs [27]. Today, rural development is one of the most important purposes in national development, because without rural

development, development at higher levels will not be feasible. Unfortunately, although villages have been considered the country's production hub, but they neglected in planning. Therefore, its effects in recent years have been in the form of declining rural populations, rural poverty, lack of employment opportunities in rural areas, lack of facilities and services in rural areas and widespread rural-urban migration and population growth and uncontrollable expansion of large cities [28].

Hence, this study aims to show the provide level of rural areas in Lorestan province in various sectors included economic, social, agricultural, educational, etc., and then show the lacks and shortcomings in the development path, which sometimes lead to environmental instability. To do this, solving the problems caused by regional imbalances is the first step in recognizing and classifying villages in terms of provide level in different aspects such as economic, infrastructure and communication, socio-cultural, health, educational and other aspects with numerical taxonomic method. This method can be an excellent strategy for planners to focus more on development indicators in future programs. Therefore, it is necessary to identify deprived areas and comprehensive development studies to moderate regional inequalities in the Lorestan province and in each village.

2. Research method

Multi-attribute decision-making techniques are a good tool for ranking in a set of available indicators due to their multidimensional and often contradictory characteristics [29]. The use of quantitative methods to measure the development of regions not only reveals the differences between regions based on different variables, but can also be identified by knowing these heterogeneities at the regional level and having comprehensive and useful information about facilities, limitations and inequality. By allocating resources to less developed areas, they have paved the way for inequality adjustment. Numerical taxonomy is one of these methods.

2.1. Numerical taxonomy method

A numerical taxonomic method was first proposed in 1763. This method was proposed in 1968 as a tool for classifying the degree of development of different nations by Professor Sigmund HULLING in UNESCO. This method is able to divide a set into more or less homogeneous subsets and provide a scale that is used in planning to understand development degree. Also, by combining a number of indicators related to the criterion under evaluation, prioritize the studied options. Nevertheless, despite its positive features and its great application in regional studies, this method faces limitations such as that it is similar to the correlated indicators and also considers the same degree of importance for all indicators [30]. Numerical taxonomy method has the following advantages in compare to other methods: 1) divides the survey set into homogeneous subsets based on the specified indicators, and 2) grading of elements and components of each homogeneous subset [31]. Taxonomic analysis is based on the analysis of some predetermined indicators used in prioritizing options and shows a complete degree of evaluation.

Numerical taxonomy method has the following steps:

1. The initial information matrix table should be formed based on the indicators used, thus the names of the study areas in a column and the values of the indicators used in the opposite columns should be placed.
2. After preparing the data matrix, due to the fact that different indicators may have different scales, it is necessary to abandon the indicators used in the scales and eliminate the heterogeneity of the indicators. To do this, the standardization method can be used, which by converting the main indicators to standard indicators, the average of all indicators will be equal to zero and their standard deviation will be equal to one. The equations (1),(2) and (3) should be used to calculate the standard matrix:

$$z = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i} \quad (1)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

where z : standardized values, x_{ij} : the amount of change i in region j , $\bar{x}_i$: average variable i , and S_i : Standard deviation of variable i . After standardizing the indicators used according to equation (1), a standardized table is obtained.

3. Calculate the distances between sections: After calculating the standard matrix, it is possible to obtain the difference between the distances of each section from the other sections for each of the indicators. To do this, we first subtract the first value of the first column from the first value of the first column, then subtract the first value of the first column from the value of the fourth row of the first column, and conduct these steps to the end for all columns.
4. Calculate the distance of each section from the other section based on the indicators used: To do this, we bring the obtained numbers to the power of two, we add them horizontally, and then we get their square root. This matrix is symmetric and its diameter is equal to zero, and each element represents the distance or difference between the two sections, which are showed in rows and columns. The minimum value in each row indicates the shortest distance.
5. Draw a figure: In this step, obtain the second shortest distance and, if necessary, the third shortest distance, so that all the sections are on the same graph.
6. Identify homogeneous sections: To achieve homogeneous sections, the upper and lower limits should be taken for the shortest

distances. To do this step, we used the equation (4) [32, 33]:

$$D^{\pm} = \bar{d} \pm 2 \cdot Sd \quad (4)$$

where: $D^{\pm}$ = upper and lower limit, Sd = standard deviation, $\bar{d}$ = average of the shortest distance which is obtained by the equations (5) and (6):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{N} \quad (5)$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{N}} \quad (6)$$

The sections that are within the upper and lower limits are part of the homogeneous sections that can be drawn in a figure, and the upper and lower sections should be classified in the form of other homogeneous groups.

7. Calculate the compound distance of each region from the ideal region: At this step, sections or areas can be graded within each homogeneous group. For this, we should re-create the standard matrix for each of the homogeneous groups, and the largest number in each of the columns of the standard matrix being chosen as the ideal value. It should be denoted that if negative indicators are selected, the smallest number should be selected as the ideal value. It then calculated the compound distance of each section of the ideal section through the equation (7) and displayed it with the c_{io} , which in fact represents the distance from section I to the ideal section o . The smaller value of c_{io} indicate the more developmental of section [32, 33]. In other words, the distance of the desired section of io will be less, and on the contrary, the large value of the c_{io} indicates the underdevelopment of the section.

$$c_{io} = \sqrt{(z_i - z_o)} \quad (7)$$

where: c_{io} = compound distance of each section of the ideal section, z_i = values in the standard matrix, and z_o = the ideal value of each column is in the above mentioned matrix.

8. Calculate the level of development of section: at this step, the relative development level of each sector can be calculated, and then arranged the sections according to the development level and their proximity or distance from the ideal section [32, 33].

3. Information and indicators

3.1. Information

Lorestan province is one of the western provinces of Iran. The province has an area of 28.308 square kilometers and a population of more than 1.760.000. This province is a mountainous land and, except for a few limited plains, it is covered by the Zagros Mountains. According to national divisions, Lorestan province has 11 cities, 29 districts and 87 villages. The cities in this province are Khorramabad, Borujerd, Dorud, Aligudarz, Kuhdasht, Azna, Selseleh(Aleshtar), Dowreh, delfan(noorabad), romeshgan and Pol-e Dokhtar. The importance of this province is due to its numerous natural resources and mines. The location of this province and its cities in the geographical map of Iran is shown in Figure 1.

In this study, the desired indicators were selected to rank and determine the level of development of the villages of Lorestan province, and then the numerical taxonomic method was used. Therefore, in current study, sampling method was accorded to the available data, and all data were used. In this section, indicators for ranking the villages of Lorestan province are presented. Numerous and various indicators for measuring rural development have been introduced in research, programs and rural development projects in the country so far.

The nature and composition of the indicators used vary according to the objectives of the research, the approach used, the data available, and the research scope. For instance, in a research project to develop rural development indicators in Iran, which was commissioned by the Sustainable



Source: Country Mapping Organization.
<http://www.ncc.gov.ir/search.html>

Figure 1: Location of the study area

Rural Development Subcommittee in 2007, these indicators are in the form of 3 environmental, social, and economical systems and 6 dimensions and in the form of 14 components and 32 criteria were used, and then introduce 217 indicators for measuring rural development in the country [25]. Scientists and various organizations have also used different indicators to estimate the extent of regional development. For example, in 1995, the United Nations Commission on Sustainable Development adopted 59 indicators (CSD, 1996). Then, in 2007, the United Nations introduced new revised indicators that included a set of 50 indicators (UNCSD, 2007).

In Iran, as in other underdeveloped and developing countries, there is no data concerning about the United Nation indicators. Therefore, with

a general view of the United Nation indicators, this research has considered 101 suitable indicators for Lorestan province. Selected indicators play an important role in the development of regions. In Iran, the statistical analysis of the provinces has been published by the Statistics Center of Iran (www.amar.org.ir). Because many data-related data were not accessible for a number of villages, villages with incomplete information were excluded.

3.2. Indicators

Selected indicators were classified into eight different categories, including education, population, infrastructure, economics, health care, cultural services, welfare, and agricultural performance. These indicators and sub-indicators are shown in Table 1.

First, studies and surveys were performed using numerical taxonomy method for all villages based on all indicators and then separately, based on each of the indicators.

4. Results and discussions

4.1. The final ranking of the villages of Lorestan province by numerical taxonomy method

The results of using the taxonomy method and ranking the villages based on the development coefficient are shown in Table 2. According to the results, the development coefficient varies from a maximum of 0,761 for Bazvand village to 1,000 in the Keshvar village.

According to the results of numerical taxonomy analysis, it was found that the distribution of facilities and services between the villages of this province has been done in a completely inappropriate way, so that the first rank in the ranking is related to Bazvand village, which according to Table 4 has a village with provided level. The Doroud and Shirvan villages have also been ranked next and were considered semi-provided areas. The rest of the villages have a development coefficient (Fi) close to each other, therefore, the rest of the villages cannot be separated in terms of development. Thereto, other villages in Lorestan province are part of the

Table 1: Related indicators and sub-indicators

Row	Main Indicator	Sub-indicator
1	Educational	Percentage of literacy for men, percentage of literacy for women, percentage of general literacy, number of primary schools per 1000 students, number of high schools per 1000 students, number of high schools per 1000 students, ratio of high school class to total schools , total number of students, the literacy rate of rural women from the total population of literate people, the ratio of associate degree (and higher degree) farmers to the total population of literate farmers, the number of schools, the ratio of students to 6 years and older population, the ratio of office and administrative staffs to the population is 6-year-old population and older than literates, the ratio of 6-year-old population and older than illiterate to population of 6-year-old and older than, the ratio of illiterate farmers to the total population of farmers, the ratio of students to the active population, the population of male students in the country, the population of female students in the country, the population of male students in abroad, , the population of female students in abroad.
2	Population	Population number, population density, per capita housing unit, rural household size, number of men, number of women, percentage of immigration imported in the last 10 years, active population coefficient.
3	Infrastructure	The length of the road per 100 square kilometers, the percentage of asphalt road from all roads, the percentage of drinking water, the percentage of electricity, the percentage of telephone, the percentage of gas piping, the percentage of rural cooperatives , percentage of implementation of pilot and rehabilitation plan, percentage of public transportation, percentage of health center.
4	Economic	Percentage of mining, employment rate, percentage of industrial factories, number of employed men, number of employed women, number of poultry units, number of livestock units, number of industrial livestock units, number of deep and semi-deep wells per exploiter, per capita tractor for each operator, per capita cow and calf per user, sheep per capita for each operator, per capita area under cultivation of annual crops per user, percentage of land users to total agricultural operators, the ratio of agricultural workers to all employees in various economic sectors, the proportion of families with cars.
5	Healthcare	Percentage of purified tap water, percentage of public baths, percentage of health centers, percentage of physicians, percentage of dentists, percentage of welfare, percentage of veterinarians, percentage of emergency, percentage of delivery facilities, percentage of pharmacy, the ratio of the number of treatment beds per 1000 population, the ratio of round-the-clock clinics.
6	Service-cultural	Percentage of library, percentage of sports venues, percentage of villages with Islamic council, percentage of mosques and Hosseineh, percentage of internet access, rural population ratio in rural cooperatives, percentage of cooperatives, percentage of rural areas, percentage of tourism services (dining hall, public residence, etc.), percentage of agricultural promoters, percentage of established banks, percentage of places for selling protein and meat products.
7	Welfare	Percentage of access to radio, percentage of access to video media, percentage of waste collection system, percentage of access to magazines and newspapers, percentage of park (green space), percentage of information and communication technology, percentage of centers postal services and postal banks, percentage of ATMs.
8	Agricultural performance	Percentage of fruit production from horticultural products, yield of irrigated wheat per hectare, yield of rainfed wheat per hectare, yield of irrigated barley per hectare, yield of rainfed per hectare, yield of other irrigated crops per hectare , yield of other rain-fed crops per hectare, average consumption of organic fertilizers per hectare in farms, average consumption of livestock fertilizers per hectare in farms, average consumption of chemical fertilizers per hectare in farms, average consumption organic fertilizers per hectare in orchards, average consumption of livestock fertilizers per hectare in orchards, the amount of chemical fertilizers per hectare in orchards, average consumption of pesticides per hectare in orchards, average consumption of pesticides per hectare on farms.

semi-provided and deprived villages. It should be noted that the villages of Olad Ghobad have been removed from our list due to incomplete information, and also the four villages included Western Zalaghi, Romiani, Western Keragah, and Goodarzi have been identified as heterogeneous areas and we excluded them from list. The results show an unfair distribution and even lack of facilities and infrastructure in the villages of Lorestan province, so that the villages ranked 14

to 82 are considered deprived villages and were in one group. Considering the distances between the villages of this province, it is necessary to pay attention to the balanced distribution of services among different villages of the Lorestan province in order to achieve proper homogeneous development at the provincial level by adopting proper planning and management.

Therefore, with the results of data analysis based on numerical taxonomy method, and development

Table 2: The final ranking of the villages of Lorestan province by numerical taxonomy method

Village	Development degree (Fi)	Rank	Village	Development degree (Fi)	Rank	Village	Development degree (Fi)	Rank
Bazvand	0,761	1	Tashkan	0,910	29	Southern Mirbag	0,946	57
Doroud	0,844	2	Shurab (Dureh)	0,911	30	Eastern Miankuh	0,948	58
Shirvan	0,849	3	Malavi	0,911	31	Western Tarhan	0,950	59
Roumehkan	0,856	4	Southern Khavi	0,911	32	Mamulan	0,950	60
East Silakhor	0,858	5	Eastern Koregah	0,911	33	Siuthern Beyranvand	0,954	61
Zhan	0,862	6	Eastern Tarhan	0,914	34	Eastern Zaz	0,956	62
Silakhor	0,866	7	Northern Kashkan	0,915	35	Zaghe	0,956	63
Heshmat Abad	0,871	8	Afrineh	0,916	36	Western Miankuh	0,957	64
Western Pachelak	0,871	9	Southern Kashkan	0,916	37	Zir Tang	0,958	65
Yousefvand	0,876	10	Veysian	0,919	38	Western Barbarud	0,959	66
Bordsereh	0,880	11	Azna	0,919	39	Mahru	0,960	67
Ghale Mozafari	0,881	12	Eastern Pachelak	0,920	40	Cham Sangar	0,960	68
Chalanchulan	0,881	13	Valanjerd	0,923	41	Tang Haft	0,961	69
Southern Kuhdasht	0,886	14	Northern Dehpir	0,923	42	Sepid Dasht	0,962	70
Doureh	0,888	15	Do Ab (Selseleh)	0,923	43	Northern Itivand	0,964	71
Northern Mirbag	0,890	16	Kunani	0,924	44	Eastern Zalaghi	0,965	72
Souri	0,891	17	Darreh Seydi	0,929	45	Farsesh	0,966	73
Eastern Japlagh	0,891	18	Bolouran	0,929	46	Ghyed Rahmat	0,971	74
Jaydar	0,891	19	Northern Kahveh	0,931	47	Southern Itivand	0,972	75
Hemat Abad	0,892	20	Darb Gonbad	0,931	48	Gerit	0,975	76
Gol Gol	0,898	21	Cheshmeh Par	0,936	49	Northern Beyranvand	0,975	77
Forouz Abad	0,898	22	Khomeh	0,936	50	Western Kakavand	0,975	78
Western Japlagh	0,900	23	Robat (Khoram Abad)	0,939	51	Eastern Kakavand	0,976	79
Nourabad (Delfan)	0,905	24	Northern Kouhdasht	0,939	52	Kakasharaf	0,978	80
Oshtorinan	0,906	25	Ghalaie	0,940	53	Pishkuh	0,978	81
Hanam	0,907	26	Western Zaz	0,942	54	Zalaghi	1,000	82
Sothorn Dehpir	0,907	27	Nur Ali	0,942	55	Keshvar		
Eastern Borborud	0,908	28	Razan	0,946	56			

coefficient of rural provinces that have small distances from each other, it can be concluded that other methods along with numerical taxonomy technique can be used to increase ranking accuracy.

4.2. General ranking of villages in Lorestan province based on each indicator by using the numerical taxonomy method

The ranking of villages in each of the indicators is shown separately in Table 4. First, all the data in the Excel software was sorted. Then, the following steps were done: standardization, calculation of compound distance, homogenization, development

Table 3: Qualitative classification of development in numerical taxonomic method

Development coefficient	Development level
0 – 0,775	Provided
0,775 – 0,884	Semi-provided
0,884 – 1	Deprived

model determination (C_{io}), and development coefficient (Fi) separately for each of the studied indicators, calculation and final ranking based on the development coefficient index.

According to Table 4, the results are as follows:

- Educational indicator: In terms of educational index, South Koohtasht village with a development score of 0,63 had the first rank and Zhan (0,65) and Doroud (0,65) villages obtained the next ranks, respectively. According to these results and Table 3, it can be concluded that the distribution of educational facilities is heterogeneous so that the villages ranked 1 to 18 are described as having privileged areas, and villages with ranking 19 to 54 are semi-provided, and next 20 villages are deprived villages. However, considering the high development coefficient of the first rank village and also the low difference between the first and last rank villages, it can be considered that the lack of planning or lack of supervision over the proper distribution of educational facilities and services is sensible and tangible.

The villages of South Dehpir, Western Zalaghi, Eastern Zaz, Shurab (Dureh), Western Tarhan, Western Kargah, Northern Kouhtashti, Golgol, Northern Mirbag, Noor Ali and Hemmat Abad were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.

- Population index: In terms of population index, Shirvan village with a development coefficient score of 0,39 has the first rank and Doroud (0,46) and Noor Abad (0,48) villages obtained the next ranks, respectively.

According to these results and Table 3, it can be said that the demographic conditions and the density of the active population are heterogeneous, so that the villages ranked 1 to 42 are described as provided areas, and the villages of ranks 43 to 73 are part of the semi-provided villages, as well as villages of Sepid Dasht, Farsesh, Cham Sangar, and Western Zaz were recognized as deprived villages. The villages of Southern Dehpir, Western Kargah, Goodarzi, Mahro, Hemmat Abad, Southern Khavah, Eastern Zalaghi, Western Zalaghi, and Northern Kouhtasht were also identified as heterogeneous areas and were removed from our ranking list.

- Infrastructure index: In terms of infrastructure index, Chalancholan village with the coefficient development score of 0,22 has the first rank and Heshmat Abad (0,25) and Silakhor (0,28) villages achieved the next ranks, respectively.

According to these results and Table 3, it can be said that the distribution of infrastructure facilities is relatively homogeneous and fair, so that villages 1 to 68 are described as providing areas, and the villages of ranks 69-72 are part of the semi-provided villages. Only Mahour and Tang Haft villages were recognized as deprived villages.

Based on the results, it can be concluded that the focus on the distribution of infrastructure structures among Lorestan villages is less visible, and a more equitable distribution are necessary. Western Zalaghi, Souri, Farsesh, Goodarzi, Bazvand, Romeshkan, Romiani, Eastern Borbrud, Western Barbroud, Razan, Eastern Tarhan, and Qalaei villages were found to be as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.

- Economical index: In terms of economical index, Zhan village with the coefficient development score of 0.60 has the first rank and Silakhor (0,62) and Dureh (0,63) villages obtained the next ranks, respectively. According to these results and Table 3, it

Table 4: Villages ranking in Lorestan province based on each of the indicators using the numerical taxonomy method

Rank	Educational		Population		Infrastructure		Economical	
	Village	DC	Village	DC	Village	DC	Village	DC
1	Southern Kuhdasht	0,63	Shirvan	0,39	Chalanchulan	0,22	Zhan	0,60
2	Zhan	0,65	Dorud	0,46	Heshmat Abad	0,25	Silakhur	0,62
3	Dorud	0,65	Nur Abad (Delfan)	0,48	Silakhur	0,28	Dorud	0,63
4	Hanam	0,66	Southern Kuhdasht	0,51	Yusefvand	0,29	Western Pachelak	0,64
5	Shirvan	0,68	Northern Mirbag	0,53	Dureh	0,35	Eastern Japlagh	0,66
70	Boluran	0,94	Eastern Zaz	0,84	Eastern Zalaghi	0,80	Razan	0,90
71	Eastern Zalaghi	0,94	Kakasharaf	0,86	Cham Sangar	0,81	Ghayed Rahmat	0,90
72	Ghalayi	0,95	Eastern Tarhan	0,86	Keshvar	0,84	Northern Beyranvand	0,90
73	Gerit	0,97	Keshvar	0,86	Mahru	0,93	Northern Khaveh	0,91
74	Farsesh	0,98	Sepid Dasht	0,89	Tang Haft	1,00	Farsesh	0,92
75	Dare Seyedi	1,00	Farsesh	0,90			Pishkuh Zalaghi	0,92
76			Cham Sangar	0,90			Sepid Dasht	0,95
77			Western Zaz	1,00			Eastern Zalaghi	0,95
78							Western Zalaghi	0,96
79							Cham Sangar	0,96
80							Tang Haft	1,00
Rank	Health care		Services and cultural		Welfare		Functional-agricultural	
	Village	DC	Village	DC	Village	DC	Village	DC
1	Rumiyan	0,70	Heshmat Abad	0,53	Chalanchulan	0,50	Yusefvand	0,64
2	Northern Dehpir	0,70	Oshtorinan	0,58	Silakhur	0,51	Ghale Mozafari	0,68
3	Bardeh Sareh	0,70	Tashkan	0,59	Eastern Barbarud	0,67	Rumeshkan	0,72
4	Eastern Barbarud	0,72	Bardeh Sareh	0,60	Nur Abad (Delfan)	0,67	Cham Sangar	0,72
5	Azna	0,72	Western Pachelak	0,61	Zhan	0,71	Ghalayi	0,75
71	Cham Sangar	0,92	Eastern Kakavand	0,85	Southern Beyranvand	0,98	Kargah	0,96
72	Pishkuh Zalaghi	0,93	Pishkuh Zalaghi	0,86	Eastern Kakavand	0,98	Ghayed Rahmat	0,999
73	Mamulan	0,93	Western Miankuh	0,86	Tang Haft	0,987	Zaghe	0,999
74	Western Kakavand	0,94	Cham Sangar	0,86	Western Zalaghi	0,987	Eastern Barbarud	0,999
75	Southern Itvand	0,94	Western Kakavand	0,88	Keshvar	0,987	Southern Beyranvand	1,00
76	Eastern Kakavand	0,94	Mahru	0,88	Kakasharaf	0,988	Western Miankuh	0,95
77			Tang Haft	0,92	Cham Sangar	0,992		
78	Northern Kuhdasht	0,96	Western Zalaghi	1,00	Souri	0,996		
79	Western Zalaghi	1,00			Western Zaz	0,996		
80					Eastern Zaz	1,00		

DC: Development coefficient

can be said that the distribution of facilities, structures and units effective in economic conditions is heterogeneous. Villages with ranks of 1 to 22 are described as providing areas, and the villages of ranks 23 to 67 are part of the semi-provided villages, as well as villages with ranking from 68 to 80 were recognized as deprived villages.

The economic index as well as its infrastructure is among the factors affecting various indicators that should be given more attention, and lack of planning and mismanagement regarding the economic index can be one of

the main reasons of underdevelopment and deprivation in different villages. It should be noted that the villages of Bolouran, Western Kargah, Northern Koohdasht, Western Miankooh, Bazvand and Noor Ali were found to be as heterogeneous areas and were omitted from the ranking list.

- Health care index: In terms of health care index, Romiani village with a development coefficient score of 0,70 has the first rank and Western Zalaghi village (1,00) allotted the last rank, which has a difference of 0,30 coefficients with each other, which shows the

lack of proper distribution of facilities and health infrastructure is at the village level of Lorestan province. According to these results and Table 3, the first to 21st rank villages are described as providing villages, and the villages of ranks 22 to 61 are part of the semi-provided villages, as well as villages with ranking from 62 to 79 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Tang Haft, Shirvan, Goodarzi, Keshvar, Razan, and Romeshkan were identified as heterogeneous areas and were deleted from the ranking list.

- **Services and cultural index:** In terms of service and cultural index, Heshmat Abad village, with a development coefficient score of 0,33 had the first rank and Western Zalaghi (1,00) gained the last rank. According to these results and Table 3, it can be seen that the villages with ranking from 1 to 50 are described as providing villages, and the villages of ranks 51 to 76 are part of the semi-provided villages, as well as Tang Haft and Western Zalaghi were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Eastran Japlagh, Goodarzi, Western Japlagh, Cheshmeh Par, Northern Khavah, Romiani, and Silakhor were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.
- **Welfare index:** In terms of welfare index, Chalancholan and Eastern Zaz villages were ranked first and last, with a development score of 0,501 and 1,00, respectively. According to these results and Table 3, it can be seen that the villages with ranking from 1 to 18 are explained as providing villages, and the villages of ranks 19 to 45 are part of the semi-provided villages, as well as villages from ranks of 46 to 80 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Ghayed Rahmat, Goodarzi, Western Pachelak, Northern Mirbag, and Eastern Silakhor were also identified as heterogeneous areas and were removed from the ranking list.

- **Functional-agricultural index:** In terms of service and cultural index, Yousefvand village, with a development coefficient score of 0,638 had the first rank and Southern Beyranvand (1,00) obtained the last rank. According to these results and Table 3, it can be concluded that the villages with ranking from 1 to 6 are explained as providing villages, and the villages of ranks 7 to 21 are part of the semi-provided villages, as well as villages from ranks of 22 to 75 were identified as deprived villages. The villages of Bazvand, Cheshempar, Dare Seyedi, Romiani, Oshtorinan, Tang Haft, Souri, Mahru, and Eastern Silakhor were identified as heterogeneous areas and were omitted from the ranking list.

5. Conclusion

In recent decades, rural development has been one of the main examples of development in most third world countries, hence it is a strategy to improve the social and economic life of the poor people in village and make a comprehensive effort to reduce poverty, and efforts should be made in village areas to increase production and performance, and in the general context of national policies, this should be taken into account [26]. In fact, there is a connection between rural development and national development (Cochrane, 2007). However, by examining and evaluating the distribution of services and facilities at the provincial and intra-provincial level, especially at the rural level, the need for special awareness to services and facilities distributions is more expected.

Due to the geographical location of Lorestan province and being located in the Zagros Mountains and semi-humid and semi-arid climate zones [34], this province has a great potential for development that can be further studied. Also, in some villages of Lorestan province, it is observed that although they are not in a good position in the ranking based on all indicators, but they have high rankings in the evaluation based on each of the indicators. For instance, Chalancholan

village, which is ranked 13th in the ranking based on all indicators and counted as a semi-provided areas, based on the infrastructure index, this village has the first rank, (development coefficient: 0,22), which shows it is suitable for development in terms of infrastructure.

Therefore, it can be concluded that in many development indicators, the planning were formed some villages have made relative progress in one dimension and these villages have not been properly developed in the other indicators, and this has caused to reduction rural development level for all indicators. By having a suitable planning for the homogeneous distribution of infrastructure, services, and comprehensive facilities in each of the villages of the Lorestan province, it is easy to imagine a coherent program that is appropriate to the comprehensive progress approach at the provincial level. In this regard, we can present the following suggestions:

1. Use studies and research on implementation and planning to prioritize villages
2. Encouraging private investment to progress the socio-economic indicators of the Lorestan villages
3. Establishment and reinforcement of service centers in the villages and central rural
4. Improving the business environment and creating a suitable environment for using personnel in various sectors
5. Considering the deprivations in the priority of development planning can decrease the gap amongst the villages. According to our results, it can be said that most of the villages of Lorestan province are deprived and need more attention from the authorities.
6. Balancing the pattern of distribution of facilities and services, as well as decentralizing some villages in the Lorestan province to benefit other villages
7. Pay attention to the capabilities of each region and appropriate policies to create jobs in deprived villages

8. Providing social welfare and welfare services according to all settlements of the province, especially rural areas to prevent the migration from rural areas to cities.

6. References

- [1] C. Xu, M. Liu, S. An, J. M. Chen, and P. Yan, "Assessing the Impact of Urbanization on Regional Net Primary Productivity in Jiangyin County, China," *Journal of Environmental Management*, vol. 85, no. 3, pp. 597–606, 2007.
- [2] J. Xi and N. N. Cho, "Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban–rural transects: A case study of Guangzhou, China," *Landscape and Urban Planning*, vol. 79, no. 1, pp. 96–109, 2007.
- [3] M. Sohel Rana, "Status of water use sanitation and hygienic condition of urban slums: A study on Rupsha Ferighat slum, Khulna," *Desalination*, vol. 246, no. 1–3, pp. 322–328, 2009.
- [4] United Nations Development Programme (UNDP), *Human Development Report 2003. Millennium Development Goals: A compact among nations to end human poverty*. New York, Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [5] J. Field, *Social capital: Keys Ideas*, 2nd ed., P. Hamilton, Ed. The Open University, Milton Keynes outledge, 2008.
- [6] B. A. Sullivan, M. Snyder, and J. L. Sullivan, *Cooperation: The Political Psychology of Effective Human Interaction*, 1st ed. Wiley-Blackwell, 2007.
- [7] M. Pacione, *Urban Geography, a Global Perspective*. London: Routledge, 2003.
- [8] A. Winkler, "Measuring Regional Inequality: An Index of Socio-Economic Pressure for Serbia," *Collection of Papers - Faculty of Geography at the University of Belgrade*, vol. 60, pp. 81–102, 05 2012.
- [9] D. Clark, *Urban World/Global City*. London and New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2003.
- [10] C. A. Archibong, "Technology, infrastructure and entrepreneurship: Role of the government in building a sustainable economy, school of business and economics North Carolina & T State University," *The International Journal Of Humanities and Social Studies*, vol. 3, no. 11, pp. 313–323, 2004.
- [11] Y. Azadi and H. BeikMohammadi, "Analysing and ranking development levels of rural regions in the Townships of Ilam Province," *Journal of Spatial Planning*, vol. 2, no. 2, pp. 41–62, 2013.
- [12] R. Das and A. K. Das, "Industrial Cluster: An Approach for Rural Development in North East India," *International Journal of Trade, Economics and Finance*, vol. 2, no. 2, pp. 161–165, 2011.
- [13] M. Piwowarski, D. Milaszewicz, M. Latuszyńska, M. Borawski, and K. Nermend, "TOPSIS and VIKOR

- methods in study of sustainable development in the EU countries,” *Procedia Computer Science*, vol. 126, pp. 1683–1692, 2018.
- [14] S. Amanpour, S. Mokhtari Chelchah, R. Hosseini Kahanj, and E. Veisi, “Spatial Analysis and Evaluation of Rural Development (Case Study: Counties of Chaharmahal & Bakhtiari),” *Journal of Research & Rural Planning*, vol. 4, no. 2, pp. 97–110, 2015.
- [15] B. Dev, “Assessing Inequality Using Geographic Income Distributions,” phdthesis, University of California, Santa Barbara and San Diego state University, 2014.
- [16] T. Piketty and E. Saez, “Inequality in the Long Run, the since of Inequality,” *Science*, vol. 344, no. 6186, pp. 838–843, 2014.
- [17] J. Oliveira Soares, M. M. Lourenço Marquês, and C. M. Ferreira Monteiro, “A multivariate methodology to uncover regional disparities: A contribution to improve European Union and governmental decisions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 145, no. 1, pp. 121–135, 2003.
- [18] M. Leshner and S. Miroudot, “Analysis of the Economic Impact of Investment Provisions in Regional Trade Agreements,” OECD Trade Policy Papers, No. 36, OECD Publishing, Paris, techreport, 2006.
- [19] T. Molnar, “Factor Influencing Development Level of Settlements in South-Transdanubia,” *Journal of Central European Agriculture*, vol. 8, no. 3, pp. 277–284, 2007.
- [20] R. M. Al-Hassan and X. Diao, “Regional disparities in Ghana: Policy options and public investment implications,” International Food Policy Research Institute (IFPRI), GSSP working papers 2, 2007.
- [21] C. Rosenstein, “Cultural development and city neighborhoods,” *City, Culture and Society*, vol. 2, no. 1, pp. 15–29, 2011.
- [22] S. Jakub and T. Marcela, “Factors Affecting Development of Rural Areas in the Czech Republic: A Literature Review,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 220, pp. 496–505, 2016.
- [23] M. Mousavi, A. Meshkini, M. Vaisy, and M. Hosseini, “Assessing the levels of development of health services with decision-making model - several criteria) Case study: Cities of Khorasan Razavi province,” *Human settlement planning studies*, vol. 11, no. 37, pp. 99–112, 2016.
- [24] R. Hodder, *Development Geography (Routledge Contemporary Human Geography)*, 1st ed. Routledge, 2000.
- [25] R. Rezvani, *Introduction to Rural Development Planning in Iran*. Tehran, Iran: Qomes Publication, 2004.
- [26] A. Oddershede, A. Arias, and H. Cancino, “Rural development decision support using the Analytic Hierarchy Process,” *Mathematical Computer Modelling*, vol. 46, no. 7–8, pp. 1107–1114, 2007.
- [27] Millennium Challenge Corporation, *The Agency for International Development and the Millennium Challenge Corporation : fiscal year 2012 budget requests and future directions in foreign assistance : hearing before the Committee on Foreign Affairs, House of Representatives, One Hundred Twelfth Congress, first session, March 16, 2011*. United States: Government Publishing Office, 2011.
- [28] E. B. Barrios, “Infrastructure and rural development: household perceptions on rural development,” *Progress in planning*, vol. 70, no. 1, pp. 1–44, 2008.
- [29] T. Prato and G. Herath, “Multiple-criteria decision analysis for integrated catchment management,” *Ecological economics*, vol. 63, no. 2, pp. 627–632, 2007.
- [30] J. Mohammadi, A. Abdoli, and M. Fathi Beyranvand, “Investigating the level of development of Lorestan province cities by housing and welfare-infrastructure services, agriculture and industry,” *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, vol. 12, no. 25, pp. 127–150, 2013.
- [31] P. Kline, *An easy guide to factor analysis*. London and New York: Psychology Press, 1994.
- [32] K. Kalantari, *Data processing and analysis in socio-economic research using SPSS software*, 2nd ed. Tehran: Sharif Publishing, 2006.
- [33] B. Saroukhani, J. Tavakoli Vala, and A. Rostamzadeh, “Numerical Taxonomy and Its Application in Social Research,” *Journal of Historical Sociology*, vol. 4, no. 1, pp. 171–194, 2012.
- [34] P. Attarod, S. M. M. Sadeghi, T. G. Pypker, and V. Bayramzadeh, “Oak trees decline; a sign of climate variability impacts in the west of Iran,” *Caspian Journal of Environmental Sciences*, vol. 15, no. 4, pp. 373–384, 2017.

Measuring angular coordinates in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) positioning systems and developing a new phase-metric method for goniometric control of UAVs

O. R. Kuzichkin ^{*,a} , G. S. Vasilyev ^a , D. I. Surzhik ^b , A. V. Grecheneva ^b ,
I. A. Kurilov ^b , S. M. Kharchuk ^b 

^aBelgorod State University, Belgorod, Russia.

^bVladimir State University, Vladimir, Russia.

Abstract.- For the safe operation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), an effective Automatic Control System (ACS) is necessary, which for successful operation requires high accuracy of the initial information about the UAV's position in space. Based on the analysis of the shortcomings of the known orientation systems, a phase-metric method of goniometric (angular) control based on accelerometric and gyroscopic transducers for positioning the UAV is proposed, which has a higher accuracy and a wider range of measurement angles. The conducted study showed that in a wide range of rotation angles from 10 to 90 degrees, the root mean square error (RMS) of the results of calculating the rotation angle using the phase-metric method is 8,78 times less than the RMS of the results of calculating the rotation angle using the arctangent function. Reducing the error determines the effectiveness of the proposed method in UAV control systems.

Keywords: unmanned aerial vehicles (UAV); orientation system; goniometer control; phase-metric method; accelerometer; gyroscope.

Medición de las coordenadas angulares en los sistemas de posicionamiento de Vehículos Aéreos No tripulados (VANT) desarrollando un nuevo método fase-métrico para el control goniométrico de los VANT

Resumen.- Para la operación segura de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), es necesario un sistema de control automático (SCA) efectivo, que para una operación exitosa requiere una alta precisión de la información inicial sobre la posición del VANT en el espacio. Basado en el análisis de las deficiencias de los sistemas de orientación conocidos, se propone un método de control goniométrico (angular) de fase métrica basado en transductores acelerométricos y giroscópicos para posicionar el VANT, que tiene una mayor precisión y un rango más amplio de ángulos de medición. El estudio realizado mostró que en un amplio rango de ángulos de rotación de 10 a 90 grados, el error cuadrático medio (RMS) de los resultados de calcular el ángulo de rotación usando el método de fase métrica es 8,78 veces menor que el RMS de los resultados de calcular el ángulo de rotación usando la función arcotangente. La reducción del error determina la efectividad del método propuesto en los sistemas de control de VANT.

Palabras clave: vehículos aéreos no tripulados (VANT); sistema de orientación; control de goniómetro; método fase-métrico; acelerómetro; giroscopio.

Received: August 31, 2020.

Accepted: October 05, 2020.

1. Introduction

The effective functioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) is provided by an automatic control system that performs the tasks of ensuring the required dynamic properties of the UAV, stabilizing the UAV's angular position and automating

^{*}Correspondence author:
e-mail: eav@ores.su (O. R. Kuzichkin)

trajectory control [1]. An investigation considered the use of ideal control hypothesis for the direction, route and control hypothesis of airplane, shuttle and rockets. A general methodology was adopted that includes modern control strategies based on multi-parameter trajectory optimization for each vehicle [2]. The ideal ways of each UAV were gotten by the hereditary calculation in an equal structure. As indicated by the elements of way arranging, hereditary encoding has a few files. Another hereditary administrator was acquainted with select a suitable pair of chromosomes for hybrid activity. The adequacy of the strategy was appeared by a few reproductions [3]. Another perception technique that utilizes UAVs to overview park-based physical movement was created. Contrasted with these strategies, the UAV perception instrument, covering bigger objective regions, is reasonable for including park clients in an increasingly dependable and effective manner and mapping their utilization designs; in any case, the device is more fragile at gathering itemized client data and looking over under poor climate conditions. In this manner, the UAV technique could supplement existing devices. At long last, this investigation proposed pragmatic ramifications of the UAV perception technique [4].

First of all, the unstable angular position of the UAV causes a decrease in flight safety. In addition, this factor leads to a decrease in the effectiveness of UAV communication systems with narrowly directed antennas due to the deviation of the angular coordinates of the aircraft from the maximum of the receiving antenna's directional diagram [5]. The deterioration of the received signal quality caused by this effect hinders the development of communication protocols for ad-hoc aircraft networks (Flying Ad Hoc Network, FANET) that use directional antennas and increase network performance compared to protocols based on omnidirectional antennas. For instance, a novel MAC convention, LODMAC (Location Oriented Directional MAC), which fuses the use of directional radio wires and area estimation of the neighboring hubs inside the MAC layer was introduced [6, 7]. These aspects determine the relevance of the development of new UAV ACS

[8, 9, 10].

A necessary condition for reliable operation of the UAV ACS is high accuracy of the initial information about the UAV position in space. For small-sized UAVs, free-form orientation systems (FOS) based on inertial sensors (micromechanical gyroscopes and accelerometers) are the most common sensors for orientation systems [11]. The main errors of such systems are non-linearity, zero offset, and noise component. These factors have a negative impact on the accuracy of measuring spatial and angular coordinates and, as a result, reduce the safety of the aircraft.

To improve the accuracy of determining the UAV's angular orientation, integration of various types of orientation systems is used, for example, the three-axis magnetometer module, the pyrohoryzon module, and the GPS/Glonass satellite navigation system module [12]. This method of aggregation increases the accuracy of determining pitch and roll angles and eliminates errors associated with the presence of residual uncompensated magnetic interference and an error caused by the UAV's sliding angle. The linear Kalman filter calculation was inferred, the detail of how it is executed and tried was talked about. In addition, the all-encompassing Kalman filter calculation; a rendition of the straight Kalman filter which can be applied to issues in which the perception and procedure models are non-linear was broadened [13].

The purpose of this work is to analyze the known methods for measuring angular coordinates in UAV positioning systems and to develop a new phase-metric method for goniometric (angular) control of UAVs based on accelerometric transformers.

A typical FOS block diagram based on inertial sensors (micromechanical gyroscopes and accelerometers) is shown in Figure 1 [13]. The main errors of such systems are non-linearity, zero offset, and noise component.

The gyroscopic orientation system is based on integrating the signals of three gyroscopes, which are angular velocity sensors. Each of the gyroscopes measures the corresponding angular velocity ω_X , ω_Y , ω_Z . Based on the information about these projections, the yaw angles ψ , pitch

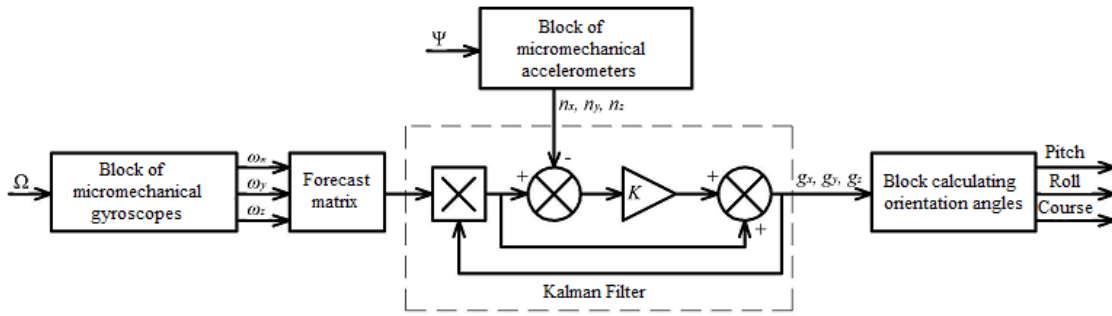


Figure 1: Typical FOS block diagram: Ω -angular velocity of the UAV, Ψ -angular orientation of the UAV

ω , and roll γ can be determined based on the expressions in equation (1) [14]:

$$\begin{aligned}\psi_{k+1} &= \psi_k + T_0 \cdot \omega_{Z_k}, \\ v_{k+1} &= v_k + T_0 \cdot \omega_{X_k}, \\ \gamma_{k+1} &= \gamma_k + T_0 \cdot \omega_{Y_k},\end{aligned}\quad (1)$$

Where T_0 is the discreteness period; $k = 0, 1, \dots$ are discrete samples.

The problem with gyroscopes when measuring UAV orientation angles is the accumulation of errors over time. This negative effect is caused by the offset of the zero obtained by pre-calibration during the flight, as well as the influence of noise.

The accelerometric orientation system is based on the measurement of accelerometer accelerations A_x, A_y, A_z (or equivalent gravity action) along the three coordinate axes X, Y, Z . Accelerometer readings are determined by projections of acceleration values on the corresponding coordinate axis:

$$\begin{aligned}A_X &= -g \cos v \sin \gamma, \\ A_Y &= g \sin v, \\ A_Z &= g \cos v \cos \gamma.\end{aligned}\quad (2)$$

Where g is the acceleration of gravity. From the ratio in equation (2), the pitch v and roll γ angles of the UAV are determined with equation (3):

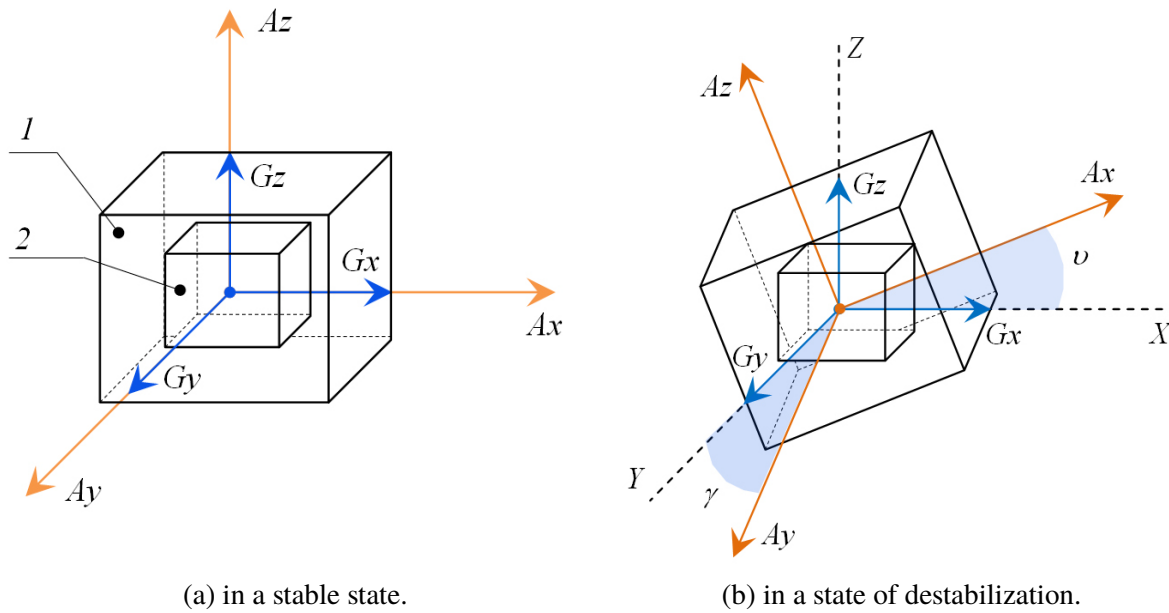
$$\begin{aligned}v &= \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left(\frac{A_Y}{g} \right), \\ \gamma &= -\frac{180^\circ}{\pi} \arctan \left(\frac{A_X}{A_Z} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

The accelerometric system does not tend to accumulate errors and is selective to the horizon plane, but is subject to accelerated movement, and the output signal contains high-frequency noise. The error in estimating the required output parameters of the FOS (pitch, roll, yaw) can be significantly increased by using accelerometric sensors with improved characteristics as part of the micromechanical accelerometer unit.

Problems of accelerometric sensors that are significant in the problem of estimating the angular position of the UAV are [15, 16]:

- Insufficient angle measurement range for many commercially available accelerometers designed for inclinometric monitoring of buildings and structures (small deviations from the vertical need to be evaluated);
- High accuracy of accelerometers with wide measurement angles-more than 10 (for UAVs in different flight modes, it takes 30-40 degrees or more);
- Insufficient threshold sensitivity (minimum defined angle) and unacceptable measurement error of small angles less than 10 due to insufficient accuracy of arctangential transformations;
- Significant influence of temperature interference and other external destabilizing factors on the measurement error.

The combined use of gyroscopic and accelerometric measurements based on the phase-metric



(a) in a stable state. (b) in a state of destabilization.
1 – the symbol of the accelerometer, 2 – the symbol of the gyroscope A_x, A_y, A_z – coordinate system of the accelerometer, G_x, G_y, G_z – coordinate system of the gyro, XYZ geographic coordinate system.

Figure 2: The principle of registering the pitch angle ν and roll angle γ of the UAV

method of goniometric (angular) control [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] for registering the pitch and roll angles of the UAV, as well as spatial positioning of the UAV, will compensate for the main drawbacks of the classical control methods described above, performed on the basis of expressions based on equations (1), (2) and (3). According to what was said, in the current study, it was tried to measuring angular coordinates and to develop a new phase-metric method for goniometric control of UAVS.

2. Proposed method

According to the proposed approach, registration of the UAV pitch angle ν and roll angle γ is performed on the basis of calculating the difference in angular parameters relative to the measurements of the gyroscopic and accelerometric converters whose coordinate axes are coaxially located according to Figure 2.

During the movement of the UAV, the registered values of angular coordinates calculated on the basis of the accelerometer are balanced relative to the registered values of the gyroscope. In contrast to similar solutions for joint accelerometric and gyroscopic measurements, in this case, increasing

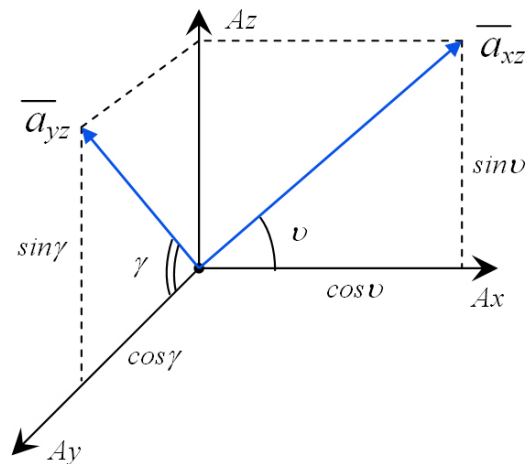


Figure 3: Phase-metric method for the computation of pitch angle ν and roll angle γ of the UAV

accuracy and stability is achieved by using the phase-metric method to calculate the inclination angle of the accelerometric transformer.

According to the phase-metric method, to calculate the pitch angle ν of the UAV and the roll angle γ from the registered values of the accelerometer, it is necessary to convert signals along the axes A_x, A_y, A_z into harmonic signals as is shown in Figure 3 according to equations (4), (5)

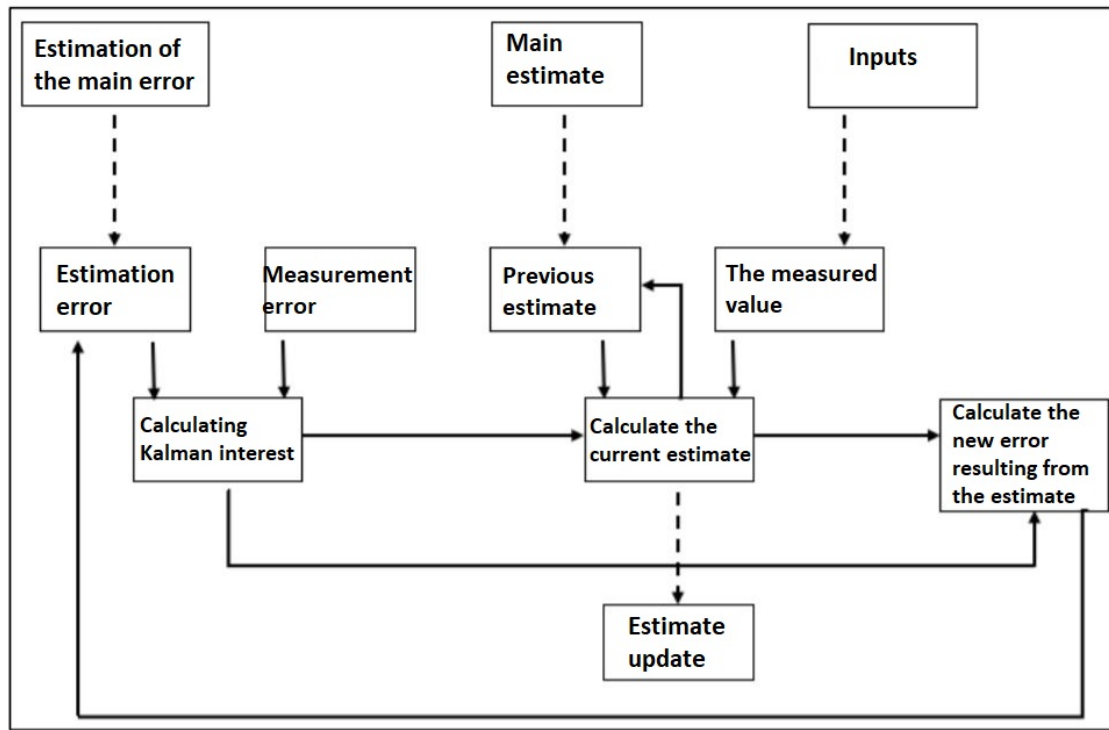


Figure 4: Diagram of Kalman filter implementation steps

and (6):

$$U_x = A_x \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

$$U_y = A_y \cdot U \cdot \cos \omega t \quad (5)$$

$$U_z = A_z \cdot U \cdot \sin \omega t \quad (6)$$

According to trigonometric laws the pitch angle ν and roll angle γ are determined based on the expressions (7) and (8):

$$U_\nu = a_x \cdot \cos \omega t + a_z \cdot \sin \omega t, \quad (7)$$

$$U_\gamma = a_y \cdot \cos \omega t + a_z \cdot \sin \omega t. \quad (8)$$

Then, after performing the conversion, the expressions for determining the pitch and roll angles ν and γ are obtained by (9) and (10):

$$\begin{aligned} U_\nu &= a \cdot \sin \nu \cdot \cos \omega t + a \cdot \cos \nu \cdot \sin \omega t \\ &= a \cdot \sin(\omega t + \nu) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_\gamma &= a \cdot \sin \gamma \cdot \cos \omega t + a \cdot \cos \gamma \cdot \sin \omega t \\ &= a \cdot \sin(\omega t + \gamma) \end{aligned} \quad (10)$$

3. Results and discussion

At first place, we will take a closer look at the steps of the standard Kalman filter which also represents the overall view of the proposed phase-metric method. First of all, Figure 4 gives a more detailed view of the Kalman filter design process.

As a first step, how to calculate Kalman interest is shown. Kalman interest is a measure to examine the ratio between the accuracy of measurements (observations) and the accuracy of estimates. As can be seen in Figure 4, the calculation of Kalman interest is clearly visible. Based on this, Kalman's interest formula is as equation (11):

$$KG = \frac{E_{est}}{E_{est} + E_{mea}} \quad 0 < KG < 1 \quad (11)$$

Where KG , E_{est} and E_{mea} are Kalman interest, Estimation error, and Measurement error, respectively. As the measurement accuracy decreases and the estimation accuracy increases, Kalman's interest rate approaches zero value. This indicates that the actual value is approaching. Now to be able to estimate the desired parameter at

the present time. Based on previous estimates, is obtained the equation (12):

$$E_{estt} = E_{estt-1} + KG(MEA - E_{estt-1}) \quad (12)$$

Where t , MEA and Est are time, the measured value, and the estimated value, respectively. The third basic equation of a standard Kalman filter according to the equation (13).

$$\begin{aligned} E_{estt} &= \frac{E_{mea} \cdot E_{estt-1}}{E_{mea} + E_{estt-1}} \\ &= (1 - KG)(E_{estt-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

The equation (13) are the three main equations of the Kalman filter steps. As a result, according to the three equations, we can easily run them backwards and then achieve the desired value.

The resulting angle values must be subtracted from the angle values recorded by the gyroscopic transducer. This will calculate the desired pitch and roll angles ν and γ , which must be compensated for the spatial location of the UAV body using the balancing system and the control system.

The error of the results of calculating the angle of rotation based on two methods (phase-metric and using the arctangent function) was determined by comparing the calculated angle with the preset angle of rotation of the gear shaft (positioning accuracy $0,001^\circ$). The rotation angle values were set to 1° , then from 15° to 90° in increments of 15° . The study showed that the standard deviation of calculation results of rotation angle via phase-metric method is 8,78 times less than a standard deviation of calculation results of rotation angle using the inverse tangent.

4. Conclusions

To create effective UAV control systems, it is necessary to ensure high accuracy of the initial information about the UAV's position in space. To improve the accuracy of determining the UAV's angular orientation, various types of orientation systems are integrated. The disadvantage of this approach is the high hardware and algorithmic

complexity so the phase-metric method can be a good alternative that does not have these disadvantages. Based on the analysis of the shortcomings of the accelerometric and gyroscopic orientation system, a phase-metric method of goniometric control based on accelerometric and gyroscopic transducers for positioning UAVs is proposed.

The combined use of gyroscopic and accelerometric measurements based on the phase-metric method of goniometric (angle-measuring) control for registering the pitch and roll angles of the UAV, as well as spatial positioning of the UAV, will compensate for the main disadvantages of classical control methods performed on the basis of arctangent transformations by improving the exactness of deciding the UAV's precise direction. (insufficient angle measurement range, high error of accelerometers with wide measurement angles, insufficient threshold sensitivity, significant influence of temperature interference and other external destabilizing factors on the measurement error).

The study showed that in a wide range of rotation angles from 10° to 90° , the results of calculating the rotation angle using the phase-metric method are 8,78 times less than the results of calculating the rotation angle using the arctangent function. Reducing the error determines the effectiveness of the proposed method in UAV control systems.

Acknowledgments

The work was supported by RFBR grant 19-29-06030-MK "Research and development of wireless ad-hoc network technology between UAVs and smart city dispatch centers based on adaptation of transmission mode parameters at different levels of network interaction". The theory was prepared as part of the implementation of the state task FZWG -2020-0029 "Development of theoretical foundations for building information and analytical support for telecommunication systems for geo-ecological monitoring of natural resources in agriculture".

5. References

- [1] D. Werner, "Drone Swarm: Networks of Small UAVs Offer Big Capabilities," Consortium for Robotics and Unmanned Systems Education and Research, Technical report, 2013.
- [2] A. Tewari, "Advanced control of aircraft, spacecraft and rockets," in *Aerospace series*, I. Moir, A. Seabridge, and R. Langton, Eds. John Wiley&Sons, 2011, vol. 37.
- [3] H. Shorakaei, M. Vahdani, B. Imani, and A. Gholami, "Optimal cooperative path planning of unmanned aerial vehicles by a parallel genetic algorithm," *Robotica*, 2016.
- [4] K. Park and R. Ewing, "The usability of unmanned aerial vehicles (UAVs) for measuring park-based physical activity," *Landscape and Urban Planning*, vol. 167, pp. 157–164, 2017.
- [5] I. Caragiannis, C. Kaklamanis, E. Kranakis, D. Krizanc, and A. Wiese, "Communication in wireless networks with directional antennas," in *Proceedings of the twentieth annual symposium on Parallelism in algorithms and architectures*, Munich, Germany, 2008.
- [6] S. Temel and I. Bekmezci, "LODMAC: Location oriented directional MAC protocol for FANETs," *Computer Networks*, vol. 83, pp. 76–84, 2015.
- [7] A. I. Alshabtat, L. Dong, J. Li, and F. Yang, "Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 48–54, 2010.
- [8] D. Dwivedi, G. S. Priyanka, G. S. Brindha, and G. E. Visuvunathan, "Unmanned aerial vehicle (UAV) safety system using Android app," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 3, no. 3, pp. 272–279, 2015.
- [9] V. V. Koryanov, T. V. Kokuytseva, A. G. Toporkov, S. N. Iljukhin, N. Mohamado, and V. Da-Poian, "Concept development of control system for perspective unmanned aerial vehicles," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 151. EDP Sciences, 2018, p. 04010.
- [10] C. Paz, S. Nesmachnow, and J. H. Toloza, "A Parallel Multilevel Data Decomposition Algorithm for Orientation Estimation of Unmanned Aerial Vehicles," in *Latin American High Performance Computing Conference*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 206–220.
- [11] A. V. Ladonkin and M. N. Mashnin, "Automated system for determining and correcting the autopilot coefficients of an unmanned aerial vehicle," in *Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences*, 2011, pp. 66–71.
- [12] I. V. Prokopiev and A. V. Betskov, "Structure of the control system for special-purpose unmanned aerial vehicles," in *Proceedings Of the international Symposium "Reliability and quality"*, 2012, pp. 84–85.
- [13] H. Durrant-Whyte, *Introduction to Estimation and the Kalman Filter*. Australia: Australian Centre for Field Robotics, The University of Sydney, 2001.
- [14] V. V. Matveev and M. G. Pogorelov, "Autopilot of an unmanned aerial vehicle based on a smartphone," in *Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences*, 2015, pp. 136–148.
- [15] J. Doscher, "Accelerometer Design and Applications," Analog Devices, Tech. Rep., 2008.
- [16] C. J. Fisher, "Using an Accelerometer for Inclination Sensing," Analog Devices, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., Application Note AN-1057, 2010.
- [17] R. Mukherjee, J. Basu, P. Mandal, and P. K. Guha, "A review of micromachined thermal accelerometers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 27, no. 12, p. 123002., 2017.
- [18] T. A. V. Walsum, A. Perna, C. M. Bishop, C. P. Murn, P. M. Collins, R. P. Wilson, and L. G. Halsey, "Exploring the relationship between flapping behaviour and accelerometer signal during ascending flight, and a new approach to calibration," *International journal of avian science*, vol. 162, no. 1, pp. 13–26, 2019.
- [19] M. Andrejašić, "MEMS ACCELEROMETERS," in *University of Ljubljana, Faculty for mathematics and physics, Department of physics Seminar*, 2008, pp. 1–17.
- [20] A. Grecheneva, N. Dorofeev, and O. Kuzichkin, "Analysis of mistakes and errors application of the accelerometric phase method of biomechanical control," in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, vol. 1, 2016, pp. 383–390.
- [21] A. Grecheneva, I. Konstantinov, and O. Kuzichkin, "The structure of the information system to support the goniometric accelerometric control of human biomechanics," in *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*, vol. 1, 2016, pp. 829–836.
- [22] A. V. Grecheneva, "Phase-metric method using a goniometer control on the basis of accelerometric transducers," PhD Thesis, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia, 2019.
- [23] A. V. Grecheneva, O. R. Kuzichkin, N. V. Dorofeev, and I. S. Konstantinov, "Application of accelerometric sensors in measuring goniometric systems," *Information systems and technologies*, vol. 4, no. 90, pp. 5–10, 2015.

Suspension system design for a vehicle under BAJA SAE parameters

Omar Franco-Camacho ^{*,a} , María Mago-Ramos ^a , Ricardo Ríos ^a ,
Luis Vallés-Defendine ^b 

^aMaintenance Research Line, Faculty of Engineering, Universidad Libre, Mechanics Program, Bogota, Colombia.

^bFaculty of Engineering, Universidad de Carabobo, Mechanics Program, Valencia, Venezuela.

Abstract.- This research focuses his study on the design of a suspension system for a BAJA SAE vehicle under the PARAMETERS SAE (Society of Automotive Engineers). This society organizes seventeen (17) student competitions in eight (8) design series between university students called as Collegiate Design Competitions and Collegiate Design Contests, which is included representative themes that apply to vehicles Formula SAE, Formula Hybrid, SAE Aero Design, BAJA SAE, and SAE Clean Snowmobile Challenge. This research article evaluates the types of suspension that are implemented in mini-baja vehicles, and which, in turn, complies with the regulations established by the SAE competition of the year 2020. The methodology used from the mechanical engineering and control design components, use mathematical equations that govern dynamic movement to evaluate the behavior of the suspension system that through a CAD system, achieves modeling in a real environment, evaluating factors such as material, part dimensions or system selection, which can affect its proper functioning. This research is intended to support future applications, where there are suspension systems that allow to absorb the irregularities of the terrain with loads, where it is transmitted in less proportion according to the structure of the vehicle improving the experience of handling and maneuverability required for this type of student competitions, meeting the parameters established by SAE.

Keywords: design; suspension system; mini-baja vehicle; SAE parameters.

Diseño del sistema de suspensión para vehículo de acuerdo con parámetros BAJA SAE

Resumen.- Esta investigación centra su estudio en el diseño de un sistema de suspensión para un vehículo BAJA SAE bajo los Parámetros SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices). Esta sociedad organiza diecisiete (17) concursos de estudiantes en ocho (8) series de diseño entre estudiantes universitarios denominados Competencias de Diseño Colegiado y Concursos de Diseño Colegiado, que incluyen temas representativos que se aplican a los vehículos Fórmula SAE, Fórmula Híbrida, SAE Aero Diseño, BAJA SAE, y SAE Clean Snowmobile Challenge. Este artículo de investigación evalúa los tipos de suspensión que se implementan en los vehículos mini-baja, y que, a su vez, cumplen con la normativa establecida por el concurso SAE del año 2020. La metodología utilizada a partir de los componentes de ingeniería mecánica y diseño de control, utiliza ecuaciones matemáticas que gobiernan el movimiento dinámico para evaluar el comportamiento del sistema de suspensión que a través de un sistema CAD, logra el modelado en un entorno real, evaluando factores como material, dimensiones de la pieza o selección del sistema, que pueden afectar su correcto funcionamiento. Esta investigación tiene como objetivo dar soporte a futuras aplicaciones, donde existan sistemas de suspensión que permitan absorber las irregularidades del terreno con cargas, donde se transmita en menor proporción según la estructura del vehículo mejorando la experiencia de manejo y maniobrabilidad requerida para ello, mejorando las competencias de los estudiantes, cumpliendo los parámetros establecidos por la SAE.

Palabras clave: diseño; sistema de suspensión; vehículo Mini Baja; parámetros SAE.

Received: October 28, 2020.

Accepted: November 27, 2020.

1. Introduction

The manufacture of BAJA SAE vehicles today is carried out in different universities as a degree option, in order to compete in the SAE Design Series[®] under different modalities, where it is innovated from mechanical engineering

* Correspondence author:

e-mail:omara-francoc@unilibre.edu.co (O. Franco-Camacho)

exchanging knowledge and experiences to expand the professional vision of the student.

In this order of ideas, this research adjusts its contribution in the line of maintenance research, supporting the processes and competencies that the student of the Mechanical Engineering Program of the Free University can develop for the sectors of the automotive area, in terms of design applications of these baja SAE vehicles is concerned, deepening knowledge and applications in a practical way. Likewise, a mathematical analysis is used in the modeling of the parts that constitute said automobile, its correct simulation provides information to the student and/or technical staff interested in these areas of knowledge, of an optimal performance that manages to adapt the vehicle to the regulations of the competition for the year 2020 and obtaining the control and safety required, which will allow to occupy a relevant position in this type of competitions [1, 2].

Based on the above, this research is expected to show the design parameters required by the suspension system of the V1.0 BAJA SAE vehicle, under the expertise of the mechanical engineering student, in order to achieve a reduction in the weight of the suspension system and decrease the efforts caused by the loads in the supports generated by the irregularities of the terrain, as well as a linkage of the theoretical components and applications required by the automotive sectors in real way [3, 4].

2. Methodology

For the elaboration of the required suspension system, it was chosen to perform a simulation with ANSYS, for a correct selection of the latter, taking into account the critical variables to analyze, in addition, Matlab's Simulink was used to obtain a dynamic behavior of the vibrations produced by the ground, through a graphical programming environment to model, simulate and analyze dynamic systems that have multidomain [5, 6, 7]. This research features simulated analysis of failures and behaviors in controlled environments, by implementing these software programs better performance in real applications such as the SAE

competition. The suspension system models are correlated in such a way that a dynamic model is simulated according to irregularities of the terrain through an analysis of the stationary system and its calculated maximum load, where the manufacturer's data that has been selected in the design proposal is corroborated and then make design improvements adapted to the market [8, 9].

2.1. Compression spring or springs

This research makes use of a series of springs that follow the shock to withstand the stresses produced by the irregularities of the terrain, providing greater stability, passenger comfort, aid to the recoil of the shock at the time of the shock, decreasing the pressure exerted in this, so a coil spring of compression is used (The helical spring is the most widely used on the market nationally in Colombia for general use in valves, greasers and shock absorbers) [10]. There are cylindric, conical, bionic and stamping coil compression springs, however, a cylindrical helical spring will be used, as this represents better attributes because it withstands lower tension than the other types of springs, so it distributes the loads evenly throughout it [11, 12, 13].

2.2. Spring materials

The springs are manufactured by cold or hot procedures, depending on the size of the material, the spring index and the desired properties, often during the manufacture of springs, they are relieved, after rolling, by means of moderate heat treatment according Table 1.

A compression helical spring with an original free length closes completely and returns to a reduced value. The process of inducing a permanent deformation is used by spring manufacturers to meet a free length specification or to reinforce the spring, this process is called L_o "deformation removal" [15, 16].

In that order of ideas, a coil spring used in the suspension of the mini-baja vehicle has elastic properties and good toughness, to absorb the shock between the surface and the chassis of the vehicle, for this reason, materials such as 6150 H tempered

Table 1: Carbon and spring alloy steels [14]

Piano Wire, 0.80-0.95C	UNS G10850	The most tenacious and employed
	AISI 1085	Increased stress resistance
	ASTM A228-51	Increased efforts at repeated loads
Oil-hardened wire, 0.60-0.70C	UNG G10650	Diameters from 0,12 to 3 mm
	AISI 1065	It is for general use
	ASTM 229-41	It's cheaper than piano wire
Hard drawn wire, 0.60-0.70C	ASTM 229-41	Not suitable for shock or impact loads
	UNS G 10660	Diameters from 3 to 12 mm
	AISI 1066	General and cheaper use
Chromium vanadium	ASTM A227-47	It should only be used where duration, accuracy and deflection are not important
	UNS G61500	Diameters 0.8 to 12 mm
	AISI 6150	Popular alloy for springs that involve greater stresses than those that employ carbon steel and requires fatigue resistance and high durability.
Silicon chromium	ASTM 231-41	Used for shock or impact loads
	UNS G92540	Diameters 0.8 to 12 mm
	AISI 9254	It is an excellent material alloy for springs subjected to high stresses and impact loads that require long life

steel trefiled wires, cooleds in oil, annelids, with a diameter of 9 mm [17, 18, 19].

2.3. Helical spring design

Due to the value of the equipment required by the suspension systems, the properties of the materials, the necessary parametric relationships, their adequacy assessment in terms of weight reduction, increase of the safety factor and design, which is necessary to take into account the maximum stresses, curvature effects, deflection-force ratios, tensile and compression efforts, as indicated in the following equations.

Where; the maximum stress of the wire is calculated by overlaying equations (equation (1)).

$$\tau_{\max} = \pm \frac{T_r}{J} + \frac{F}{A} \quad (1)$$

$\tau_{\max} = \frac{T \cdot \rho}{J}$. It is the formula of the maximum torque (in order to calculate the particular effort).

$\frac{F}{A}$: is direct shear stress (not bending).

But it is necessary to calculate the spring index as follows in equation (2), and the constant stress factor in equation (3).

$$C = \frac{D}{d} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{2C + 1}{2C} \quad (3)$$

Torque may be measured by a measure of the spiral curvature (which also determines the larger shear stress), as indicated in equation (4).

$$\tau = K_s = \frac{8FD}{\pi D^3} \quad (4)$$

In addition, the curvature correction factor increases the stress inside the spring, but only decreases a little on the outside, which is important for fatigue, even if there is no stress concentration factor as indicated in equation (5).

$$K_C = \frac{K_B}{K_S} = \frac{2C(4C + 2)}{(4C - 3)(2C + 1)} \quad (5)$$

The deflections of coil springs have a deflection-force ratio obtained by the Castigliano theorem, where the total corresponding deformation energy is shown in equation (6).

$$U = \frac{T^2}{2GJ} + \frac{F^2 l}{2AG} \quad (6)$$

$$y = \frac{\partial U}{\partial F} = \frac{8FD^3}{d^4 G} \left(1 + \frac{1}{2C^2} \right) \approx \frac{8FD^3 N}{d^4 G}$$

where the spring ratio is therefore;

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N} \quad (7)$$

Extension springs must have means to transfer the load from the spring to the spring body, the stress increase factors are given by equation (8), as indicated (The C index is in Table 1).

$$(K)_A = \frac{4C^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)}; C_1 = \frac{2r_1}{d} \quad (8)$$

Table 2: Preferred range of torsional stresses due to initial stress, in steel extension coil springs [20]

Index (C)	Stress Interval (MPa)	Stress interval (kpsi)
4	115-183	16,7-26,6
6	95-160	13,8-23,2
8	82-127	11,9-18,4
10	60-106	8,71-15,4
12	48-86	6,97-12,5
14	37-60	5,37-8,71
16	25-50	3,63-7,26

Compression springs have four types of ends: simple type on the right, end to square and frosted on the left, end-to-square or closed right and simple end and frosted on the left, being necessary for the calculation of the dimensions of these springs review Table 3.

2.4. Stability

A column will suffer buckling when the load is very high, so the coil springs will have a lateral deflection (roll) when it is very large, taking into account that the critical deflection is given by equation (9).

$$y_{cr} = L_o C'_1 \left[1 - \left(1 - \frac{C'_2}{\lambda_{efec}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (9)$$

Where;

y_{cr} : deflection corresponding to the onset of instability.

λ_{efec} : effective slenderness ratio.

C'_1 y C'_2 : elastic constants.

L_o : absolute stability.

2.5. Description of the structure

The structure used in this research is a shock absorber whose spring is SAE 6150 H steel (Figure 1) with the addition of vanadium that allows to inhibit the growth of the grain at high temperatures, improve the strength and toughness of the spring, in order to have high degrees of elasticity (Table 3), also, the 6150 H steel has the material components indicated in Table 4 and 5. This suspension system has the dimensions required for the perfect coupling to the vehicle [21, 22, 23].

3. CAD modeling and simulation for dynamic analysis

For the analysis of behavior of static suspension system as shown in Figure 1, the shock absorber subjected to a load was modeled and simulated with the ANSYS software. On the other hand, for the analysis of structure dynamic behavior, the system was modeled and simulated with ANSYS, SolidWorks and Matlab. All these software apply the finite element analysis technique to predict how the system will work and react in a real environment, allowing to evaluate the performance of the system before the manufacturing process. Now, the mathematical model for static analysis follows equation (10) [24, 25].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} \quad (10)$$

Where it is evident, that the unitary elongation experienced by the spring is directly proportional to the force applied on it. Using for this case the mathematical model shown in equation (11) of the Law of *Hooke*, which relates the force exerted by the spring to the elongation (x) provoked by the external force (F) applied to the end of this, as follows according to (11).

$$F = -k \cdot x \quad (11)$$

The suspension has its critical point at the time the vehicle jumps and its weight falls on both wheels, so a dynamic analysis is performed with a 45-degree lifting angle as seen in Figure 2.

Table 3: Formulas for calculating compression spring dimensions [20]

Term	Simple	Simple and frosted	Squared and closed	Squad and frosted
Extreme coils	0	1	2	2
Total spire	N_{to}	$N_{to} + 1$	$N_{to} + 2$	$N_{to} + 2$
Free length	$p \cdot N_{to} + d$	$p \cdot N_{to} + 1$	$p \cdot N_{to} + 3d$	$p \cdot N_{to} + 2d$
Solid length	$d(N_1 + 1)$	dN_1	$d(N_1 + 1)$	dN_1
Step	$(L_o - d)/N_a$	$L_o/(N_{to} + 1)$	$(L_o - 3d)/N_{to}$	$(L_o - 2d)/N_a$



Figure 1: JLMoto brand suspension system dimensioning reference 3100026.

Source: JI motor official store, <https://bit.ly/3p66Gxi>

Table 4: Steel elements SAE 6150 H

Element	Content %
Iron, faith	96,885 – 97,88
Manganese, Mn	0,60 – 1
Chromium, Cr	0,75 – 1,2
Silicon, Yes	0,15 – 0,30
Vanadio, V	0,15
Sulfur, S	0,040
Phosphorus, P	0,035

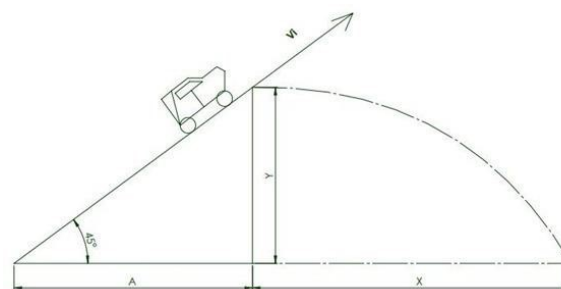


Figure 2: Critical load model scheme

Table 5: Good properties of steel SAE 6150 H

Property	International System
Tensile strength	924 MPa
Elastic limit	800 MPa
Elasticity module	205 GPa
Volume module	140 GPa
Cutting module	80 GPa
Poisson coefficient	0,29
Elongation to breakage	19,50 %
Brinell hardness	269
Rockwell B hardness	99
Rockwell C hardness	27
Machinability	55 %

in a given flight time is then calculated.

In that sense, according the model presented in Figure 2, the followings characteristic parameters can be estimated.

The Final speed is calculated by equation (12).

$$V_f = V_i \cos 45(i) + V_i \sin 45 - gt(j) \quad (12)$$

when: g : gravity, $[m/s^2]$

t : time, $[s]$.

V_i : initial velocity, $[m/s]$. $V_i = 13,88 \text{ m/s}$

$\tan 45^\circ$: Y/A

y : vertical component, $[m]$.

The speed at which the vehicle hits the ground

A: horizontal component, [m].

Distance A-1 m.

The Horizontal distance reached, knows as X value (m), was calculated by equation (13).

$$Y = \frac{(\tan 45^\circ)X - (gX^2)}{2V_i^2 \cos(45^\circ) + 1} \quad (13)$$

By developing the quadratic equation, you get:

$$\begin{aligned} 1 &= X - 0.050X^2 \\ 0.050X^2 - X + 1 &= 0 \\ X_1 &= 2 \text{ m}; X_2 = 18 \text{ m} \end{aligned}$$

Where X^2 is the distance taken for the following calculations, because it is the vertical component.

To determine the Flight time it was used equation (14).

$$t = \frac{x}{V_i \cos 45^\circ} \quad (14)$$

It is necessary to know and work with the vertical component, as it corresponds to the force with which the vehicle will exert a compression load on the suspension system.

Final velocity component Y [m/s] was estimated by equation (15), as follows.

$$V_{fy} = (V_i \sin 45^\circ - gt)j \quad (15)$$

At the same time, the Average strength [N] was calculated by equation (16), as follows.

$$F_{\text{prom}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\Delta p = mV_f - mV_i$$

Δt : time delta [s]. $\Delta t = 0.5$ s

To Suspension system calculations, it was considered $m = 265$ kg with approximately 70 kg rider. In that sense, taking as start point equation (17), the force can be calculated.

$$F = m \cdot a \quad (17)$$

a : Acceleration, [m/s^2].

m : mass of a rider, [kg].

$$F = 265 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 2599,65 \text{ N}$$

Spring calculations are based in equation (18).

$$F = kx \quad (18)$$

k : spring constant, [kg/s^2].

x : variation in length, [m].

$$k = \frac{2599,65 \text{ N}}{0,05 \text{ m}} = 51993 \text{ kg/s}^2$$

According to the manufacturer's data, the spring distance is 207 mm and the distance of the compressed spring is 70 mm

$$F = 51993 \text{ kg/s}^2 \cdot 0,137 = 7123,041 \text{ N}$$

In this way, you have a compression coil spring made of Chromium-vanadium number 17, whose outer diameter is inches and the ends are flat and frosted $\frac{7}{16}$ inches with a total turn $10\frac{1}{2}$.

To estimate Creep effort are used equations (19) and (20).

$$s_{ut} = \frac{A}{d^m} = \frac{169}{0.039^{0.168}} = 291 \text{ kpsi} \quad (19)$$

$$s_{sy} = 0.45 \cdot s_{ut} = 0.45(291) = 131 \text{ kpsi} \quad (20)$$

To determine the static load according to creep effort, it is considered that the medium diameter of the spring coil is $\frac{7}{16} = 0,400$ inches. So, parameters C , K_B and F are calculated by equations (21), (22) y (23)

$$C = \frac{0,400}{0,039} = 10,3 \quad (21)$$

$$K_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} = 1,131 \quad (22)$$

$$F = \frac{\pi d^3 s_{sy}}{8 K_B D} = \frac{\pi (0,039)^3 \cdot 131 (10^3)}{8 (1,131) \cdot 0,400} \quad (23)$$

$$F = 6,75 \text{ lbf}$$

where

C : Spring index, [m].

K_B : Bergstrosser's factor.

F : Cutting force, [lbf].

To determine the spring scale is used equation (8), obtaining k factor

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a} = \frac{(0,039)^4 (11.2) 10^6}{8(0,400)^3 (9,5)}$$

$$k = 5,33 \text{ lbf/pulg}$$

In that sense, deflection caused by shear force is calculated by equation (24)

$$y = \frac{F}{k} = \frac{6,75 \text{ lbf}}{5,33 \text{ lbf/pulg}} = 1,26 \text{ pulg} \quad (24)$$

So, the solid spring length is estimated by equation (25)

$$L_s = d \cdot N_t \quad (25)$$

$$L_s = (0.039)(10.5)$$

$$L_s = 0.400 \text{ pulg}$$

Equations (26) allows to estimate the free length (L_o) as follows

$$L_o = y + L_s = 1,26 + 0,400 = 1,66 \text{ pulg} \quad (26)$$

L_o : [pulg].

To verify the absolute stability to prevent buckling, it is necessary the accomplish of condition:

$$L_o \leq 2,63 \frac{D}{\alpha} \leq 2,63 \frac{0,400}{0,5} \leq 2,10 \text{ pulg}$$

Because the free length is less than 2,10 inches; a buckling in the spring may not occur, however, a rod inside it may be necessary, resulting in the use of the shock as a mechanical aid component in the system [26, 27].

Finally, the step between coils is calculated by equation(27)

$$p = \frac{L_o}{N_a + 1} = \frac{1,66}{9,5 + 1} = 0,158 \text{ pulg} \quad (27)$$

In the Table 6 is presented a resume of the parameters estimated by the aplication of the models mentioned.

Table 6: Results given after the application of the models

Horizontal distance reached, [m]	$X_1 = 2$ $X_2 = 18$
Flight Time (t), [s]	1,83
Final velocity component Y (V_{fy}), [m/s]	-8,14
Average strength (F_{promY}), [N]	4314,2
Spring force (F), [N]	2599,65
Spring constant (k), [kg/s ²]	51993
Hooke's law (F), [N]	7123,041
Static load force (F), [N]	30,0255
Spring scale (k), [N/m]	933,46
Deflection (y), [m]	0,032
Solid spring length (L_s), [m]	0,010
Free length (L_o), [m]	0,053

4. Simulation for shock analysis

In accordance with the design of the suspension system previously performed, a simulation is carried out using the Matlab Simulink Program, in order to observe the behavior under established parameters, thus the expected result is to reduce costs and time in the manufacture of these systems in the automotive industry. The results obtained are of interest, when evaluating the time of restoration of the system from the starting point and the on peaks that can reach when generating the crash, with the irregularities of the terrain, based on free models [1].

The above makes it necessary to raise the system state equations, having as a parameter the acceleration a time range. As the system is purely mechanical, it does not have an electrical part, so Newton's second law is used to determine the model of the state equation as noted below (Figure 3) [28, 29].

$$\sum F_i = F_t$$

$$m\ddot{x} + k[x - y] + c[\dot{x} - \dot{y}] = 0$$

$$m\ddot{y} = k[y - x] + c[\dot{y} - \dot{x}] = 0$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}[k[y - x] + c[\dot{y} - \dot{x}]]$$

where:

$\ddot{x}$: acceleration of the system, [m/s²].

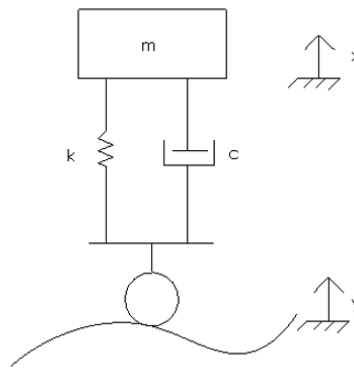


Figure 3: free body diagram of suspension system

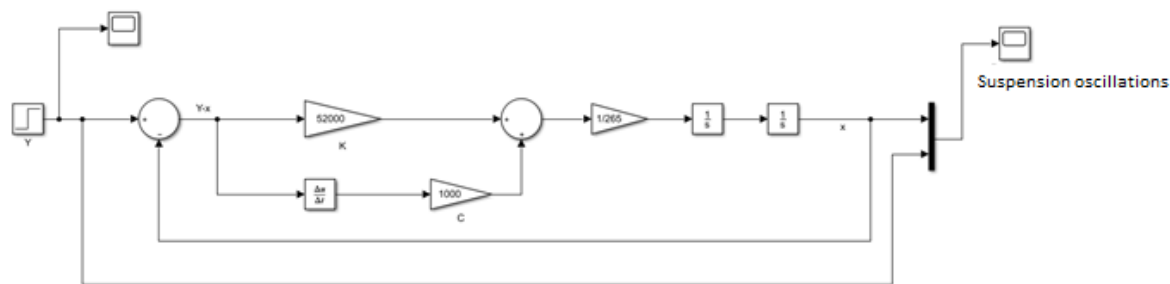


Figure 4: Control model for dynamic study of the suspension system

$\dot{x}$: speed of the system, [m/s].
 x : system displacement, [m].
 $\dot{y}$: wheel speed, [m/s].
 y : wheel displacement, [m].
 m : mass, [kg]. $m = 256$ kg
 k : spring constant, [N/m]. $k = 52000$ N/m
 c : Viscous coefficient of friction, [N·s/m].
 $c = 1000$ N · s/m

The Figure 4 shows the diagram of the implemented control and how it shows the oscillation of vibrations in the system over time. Obtaining from the previous model, a peak envelope of three (03) centimeters of deformation when taking a system input disturbance of two (02) centimeters as the initial value to which you want to reach, once the suspension, into contact with their regularities of the terrain. It is also observed that the system has a one-second signal start time as part of the system behavior with a stabilization time

of approximately four seconds until the required control signal is reached (Figures 4 and 5).

It can be verified that the suspension system properly absorbs the irregularities of the terrain in a time of 4 seconds to maintain stability and comfort in the driver. Likewise, you can control the number of oscillations that this can have by varying the spring constant and damping, as well as the value of the system peak is of paramount importance since by absorbing so much energy, this value of 75 % is linked to the establishment time and the energy that is has to stabilize the system. However, by having a lower vibration in the suspension system, it transmits greater kinetic energy to the body. Therefore, affecting the driving experience, so this type of suspension meets the optimal parameters for the correct power dissipation at right times [30].

This research requires the use of the CAD program like ANSYS 2020 for the corresponding simulation of the suspension system, incorporating

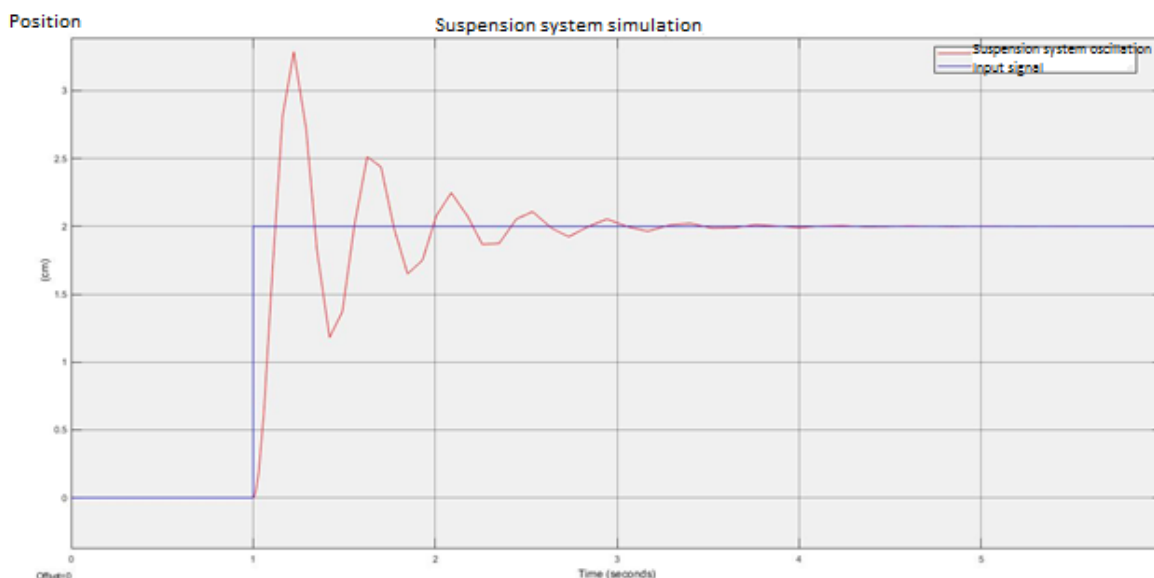


Figure 5: Suspension system oscillations under set parameters

the mesh of the suspension system and reaching the verification of the quality of the element through the mesh quality presentation offered by the ANSYS student community where a quality of the skewness metric parameter evidenced for 0,40063 which refers to a very good quality and an orthogonal quality parameter corresponding to 0,7329; significant of an equally very good quality as referred the theory evidenced below (Figure 6).

As stated above, we proceed to perform the test in which the system suspended has two rolling brackets and a maximum force, which was previously calculated at the top end of this, since it is the part that is fixed to the chassis of the vehicle and transmits the loads, Figure 7. Likewise, a mesh sizing is made which becomes thinner on the stem and spring of the damping since they are the areas of interest in deformation stresses.

By implementing the ANSYS 2020 R1 program, it is possible to generate a meshing of the suspension system with an applied force calculated in equation (12). Performing a rounding approximation of 7200 N and its due movement restrictions on the lower pin supports a stop. Having said the above, we proceed to a suspension system solution in which a focus is made on total

deformation, the equivalent elastic deformation of von-Mises, and the equivalent effort of von-Mises Table 5. According to the data provided by this simulation, it is observed that the suspension stem suffers the highest efforts and elastic limits, so that it could result in future defects or discontinuities due to fatigue or external loads in this. Likewise, a focus is made on this last effort as it is the one that gives us the information necessary to have an understanding of the maximum value in MPa and understand if the material fails with respect to the properties said in Figure 8 for this suspension system with SAE 6150 H steel.

According to the data obtained in figure 8, a topological analysis study is carried out in order to obtain a reduction in efforts and to be able to opt for another type of shock which generates greater reliability in both performance parameters and compliance with the regulations of the regulations of Baja SAE Design. Having said that, this study is generated in such a way that the restrictions are assigned Figure 8. Optimization such as the bottom bracket and shock spring as you do not want to delete or reduce material from these areas as they would affect the operation of the system for malfunction (Figure 9) [31].

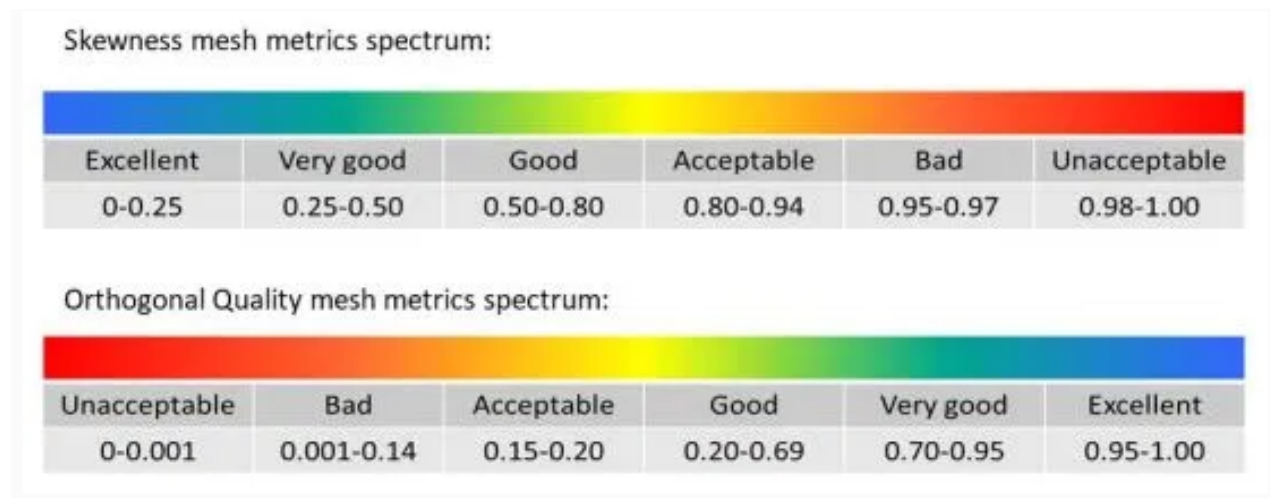


Figure 6: ANSYS mesh quality

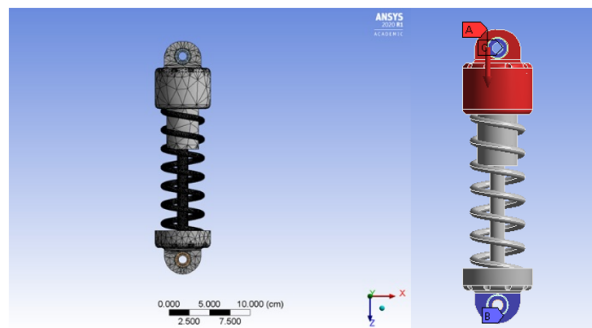
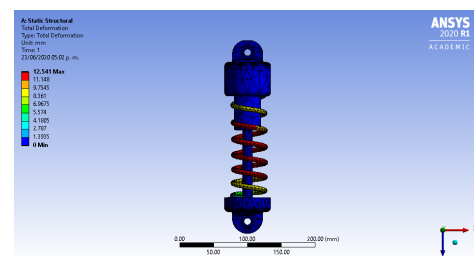


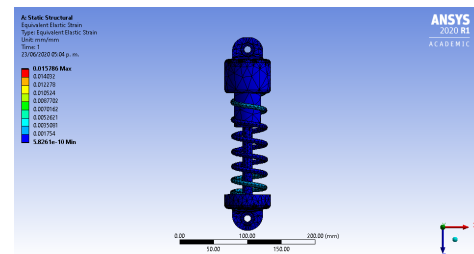
Figure 7: Meshing, Loads and structural supports applied to the suspension system

Once optimization is implemented, it is observed that there are areas such as the lower head that can be reduced by positively affecting the system and evidence that an extension of the diameter can be generated in the stem head. For the above, modifications are made to the Cad SolidWorks so that the shank diameter is extended, the diameter of the shock is enlarged, and the size of the lower head is reduced as seen in Figure 10.

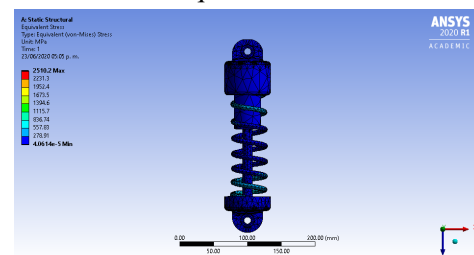
This variation in shock dimensions represents changes in maximum stress at the time of application of the same 7200 N load provided in the kinematic study of the maximum load received by the shock in a given instant of time. In this way a second static load study is carried out using the CAD program ANSYS 2020R1 in which variations are observed in terms of all stress values and deformations, resulting in a 5,34% decrease in the



(a) Total deformation



(b) vonVon-Mises equivalent elastic deformation



(c) vonVon-Mises' equivalent effort

Figure 8: Results for simulation in suspension system

shock mass and reduction an equivalent effort being now 662,42 MPa. According to the properties of the material SAE 6150 H in Table 4. Its elastic limit

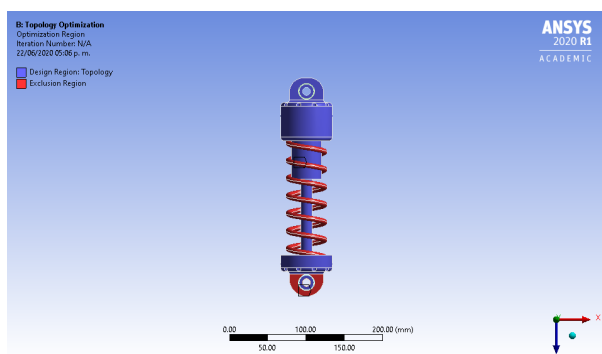
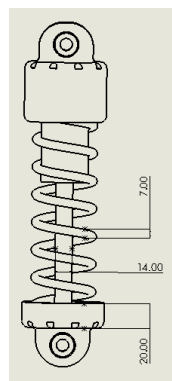
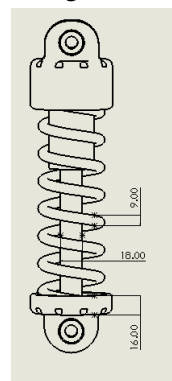


Figure 9: Areas to exclude in topological optimization



(a) Shock absorber JLMotor 250mm without topologically optimizing (mm)



(b) Topologically optimized JLMotor 250mm shock absorber (mm)

Figure 10: JLMotor 250 mm buffer design modifications

is 800 MPa which represents that such topological study and modification of the suspension geometry helps to reduce the failure in the elastic area of the material that could occur when having irregularities of the terrain. The implementation of the topological study helps reduce the efforts

and deformations as seen in Table 7. This way it can be selected under the JLMotor catalogs the type of suspension with the same or similar design characteristics proposed and thus is more optimally adapted due to the external parameters and factors posed by the SAE [32, 33, 20].

Table 7: Stress and deformation values for JLMotor 250 mm shock before and after topological optimization

	JLMotor 250mm shock absorber	JLMotor 250mm shock absorber topologically optimized
Mesh (mm)	300	300
Sizing (mm)	2	2
Elements	15168	15780
Nodes	31129	31506
Skewness	0,40063	0,46614
orthogonality	0,7329	0,7329
quality		
Element	0,66375	0,59083
quality		
Total	12,541	52,578
deformation (mm)		
Equivalent	0,00011672	0,000381
elastic		
deformation (mm / mm)		
Equivalent	2510,2	662,41
stress (MPa)		
Mass (kg)	25,984	24,595

According to the data provided by the simulations regarding the optimizations of the topological and performance of this in when the static simulation, the purchase of the shock absorber shock JLMotor 3100026 (Figure 11).

5. Discussions

Analyzing the results of total deformation, elastic deformation equivalent of von-Mises and effort equivalent of von-Mises obtained with a mesh of 350 mm and topological optimization to avoid defects due to external loads in steel 6150 H, together with design considerations such as topological optimization, three important points can be highlighted of the results obtained:

1. The selected suspension system from the JLMoto catalog meets the design and SAE



Source: JI motor official store.
<https://bit.ly/3p66Gxi>

Figure 11: JLMoto brand suspension system dimensioning reference 3100026

requirements for optimal competitive operation with the consideration that said simulated model does not respond to machining cost issues in its topological optimization and vibration reduction without affecting the mechanical properties of the material.

2. An equivalent Von-Mises stress value is achieved by ANSYS 2020R1 of 662,41 MPa, thus ensuring that the suspension system does not fail under the critical conditions of dynamic displacement, because the elastic limit of the SAE

6150 H material is 800 MPa.

3. The ANSYS software through the topological study allows reducing the shock mass by 5,34 %; making it lighter and with better performance mechanical characteristics for the conditions posed by the SAE formula and making a contribution to the automotive industry from the mechanical Engineering.

6. Conclusions

The topological optimization of the suspension system can contribute to the automotive sector at the same time reducing costs in materials and manufacturing times. In this way, it is advisable to evaluate the conditions to which the suspension system will be exposed, and accordingly, areas that do not have stress concentrators are optimized.

The analysis of oscillations over time shows a high overshoot and an establishment in four seconds, for which the system adequately absorbs the irregularities of the ground without suffering high efforts that compromise the material and generate discontinuities or cracks.

The suspension system designed exclusively for competition provides greater reliability and improved results in terms of time reduction and absorption of terrain irregularities, providing comfort and a pleasant driving experience.

7. Acknowledge

To the Research Center of the Faculty of Engineering of the Universidad Libre, headquarters in Bogotá for carrying out the financing of the research project “Design and manufacture of low mini vehicle V.1.0 under SAE parameters”, which has allowed the SIM Semillero and its members to make presentations and articles at scientific events, which has strengthened the competitions in the maintenance line for students of the Mechanical Engineering Program.

8. References

- [1] G. I. Y. Mustafa, H. P. Wang, and Y. Tian, “Vibration control of an active vehicle suspension systems using optimized model-free fuzzy logic controller based

- on time delay estimation,” *Advances in Engineering Software*, vol. 127, pp. 141–149, 2019.
- [2] J. A. García-Manrique, S. Peña-Miñano, and M. Rivas, “Manufacturing to motorsport by students,” *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 259–266, 2015.
 - [3] S. Chepkasov, G. Markin, and A. Akulova, “Suspension kinematics study of the “Formula SAE” sports car,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1280–1286, 2016.
 - [4] R. Burdzik, “Novel method for research on exposure to nonlinear vibration transferred by suspension of vehicle,” *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 91, pp. 170–180, 2017.
 - [5] I. V. Ryabov, V. V. Novikov, and A. V. Pozdeev, “Efficiency of shock absorb in vehicle suspension,” *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 354–362, 2016.
 - [6] G. M. Szyma-ski, M. Josko, F. Tomaszewski, and R. Filipiak, “Application of time–frequency analysis to the evaluation of the condition of car suspension,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 58–59, pp. 298–307, 2015.
 - [7] E. Sert and P. Boyraz, “Optimization of suspension system and sensitivity analysis for improvement of stability in a midsize heavy vehicle,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 997–1012, 2017.
 - [8] B. Németh and P. Gáspár, “LPV-based Variable-Geometry Suspension Control Considering Nonlinear Tyre Characteristics,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 26, pp. 61–66, 2015.
 - [9] C. Kavitha, S. A. Shankar, K. Karthika, B. Ashok, and S. D. Ashok, “Active camber and toe control strategy for the double wishbone suspension system,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 31, no. 4, pp. 375–384, 2018.
 - [10] J. Díaz-Mendoza, L. Vidal-Portilla, C. Ramírez-Espinoza, y C. González-Pinzón, *Diseño de un vehículo Baja SAE*, ser. Colección Textos Universitarios. Serie Investigación. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2013.
 - [11] S. K. Sharma, V. Pare, M. Chouksey, and B. R. Rawal, “Numerical studies using full car model for combined primary and cabin suspension,” *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 171–178, 2016.
 - [12] M. Nagarkar, Y. Bhalerao, G. Patil, and R. Patil, “Multi-Objective Optimization of Nonlinear Quarter Car Suspension System – PID and LQR Control,” *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 420–427, 2018.
 - [13] H. Jing, R. Wang, C. Li, and J. Bao, “Robust finite-frequency H. control of fullcar active suspension,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 441, pp. 221–239, 2019.
 - [14] H. Carlson, *Spring Designer’s Handbook*. CRC Press, 1978.
 - [15] S. Saurabh, K. Kumar, S. Kamal-Jain, S. Kumar-Behera, D. Gandhi, S. Raghavendra, and K. Kalita, “Design of suspension system for formula student race car,” *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 1138–1149, 2016.
 - [16] G. Shelke, A. Mitra, and V. Varude, “Validation of Simulation and Analytical Model of Nonlinear Passive Vehicle Suspension System for Quarter Car,” *Today Materials: Proceedings*, vol. 5, no. 9, pp. 19 294–19 302, 2018.
 - [17] W. Wang and Y. Song, “Analytical computation method for steady-state stochastic response of a time-delay nonlinear automotive suspension system,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 131, pp. 434–445, 2019.
 - [18] A. Keivan and B. Phillips, “Rate-independent linear damping in vehicle suspension systems,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 431, pp. 405–421, 2018.
 - [19] G. Yan, M. Fang, and J. Xu, “Analysis and experiment of time-delayed optimal control for vehicle suspension system,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 446, pp. 144–158, 2019.
 - [20] Associated Spring-Barnes Group, *Design Handbook*. Bristol, Conn, 1987.
 - [21] D. Pastorcic, G. Vukelic, and Z. Bozic, “Coil spring failure and fatigue analysis,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 99, pp. 310–318, 2019.
 - [22] Y. Mohammad-Hashemi, M. Kadkhodaei, and M. Mohammadzadeh, “Fatigue analysis of shape memory alloy helical springs,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 161–162, p. 105059, 2019.
 - [23] T. Keerthi vasan, S. Shibi, and C. Tamilselvan, “Fabrication and testing of composite leaf spring using carbon, glass and aramid fiber,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 45–51, 2019.
 - [24] J. Foard, D. Rollason, A. Thite, and C. Bell, “Polymer composite belleville springs for an automotive application,” *Composite Structures*, vol. 221, p. 110891, 2019.
 - [25] X. Ma, P. Wong, and J. Zhao, “Practical multi-objective control for automotive semi-active suspension system with nonlinear hydraulic adjustable damper,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 117, pp. 667–688, 2019.
 - [26] M. Omar, M. El-kassaby, and W. Abdelghaffar, “Parametric numerical study of electrohydraulic active suspension performance against passive suspension,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 4, p. 36093614, 2018.
 - [27] M. Benko, L. Kucera, and L. Smetánka, “Front suspension design of the lightweight vehicle,” *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 623–630, 2019.
 - [28] A. Furg, A. Myrell, A. Killinger, and R. Gadow, “Suspension and coating characterization of high velocity suspension flame sprayed (HVSFS) mixed titanium oxide–titanium carbide coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 90–96, 2019.
 - [29] J. Shigley and C. Mischke, *Design in Mechanical*

Engineering, 6th ed. Mexico: McGrawHill, 2002.

- [30] L. Harus and H. Wiwiek, "A Comparative Study of the Damping Force and Energy Absorption Capacity of Regenerative and Conventional-Viscous Shock Absorber of Vehicle Suspension," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 758, pp. 45–50, 2015.
- [31] J. Rumney, "Construction of motor vehicle springs," *Transactions (Society of Automobile Engineers)*, vol. 2, no. 2, pp. 45–56, 1907.
- [32] C. Patiño, C. Calderon, J. Ortiz, y O. Rodríguez, "Diseño y construcción de un prototipo mini baja SAE," Trabajo para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Pontificia Bolivariana., Bucaramanga, 2008.
- [33] V. Chacón, "Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos," Trabajo para optar a la título de Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Mecánica, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

Índice de materias

A

aceite de semilla, 273
acelerómetro, 367
agricultura, 343
agua, 343

C

coeficiente de rugosidad, 328
contenido, 343
control de goniómetro, 367

D

diámetro efectivo, 328
Domino Logic, 282

E

Ecuación de Manning, 328
entrecruzamiento químico, 273

F

fardo de paja, 304
flujo, 343

G

giroscopio, 367
granulometría, 328

H

hidráulica fluvial, 328
hidrogel, 273

I

indicadores de desarrollo, 353

M

método fase-métrico, 367
módulo de elasticidad, 304
Maracuyá, 273
Memristor, 282
modelo, 343
MTJ, 282

P

polifenoles, 273
Provincia de Lorestan, 353

R

riego, 343

S

sistema de orientación, 367
spat, 343
Sumador completo, 282
sustentabilidad, 304

T

taxonomía numérica, 353

V

vehículos aéreos no tripulados (VANT), 367
vivienda, 304

Subjects index

A

accelerometer, 367
administración transdérmica, 249
agriculture, 343
atrapanieblas, 319

C

Carbon Nanotube Field Effect Transistor, 294
chemical crosslinking, 273
CMOS-like Pass Transistor Logic, 294
content, 343

D

Dermal delivery, 249
design, 374
development indicators, 353
diseño, 374
Domino Logic, 282

E

effective diameter, 328
emulsión espontánea, 249

F

flow, 343
fluvial hydraulics, 328
fog, 319
Full Adder, 282

G

goniometer control, 367
granulometry, 328
gyroscope, 367

H

housing, 304
hydrogel, 273

I

irrigation, 343

L

lógica de transistor de paso tipo CMOS, 294
Lorestan Province, 353

M

mallá metálica, 319
mallá mosquitero, 319
mallá raschel, 319
Manning's equation, 328
Memristor, 282
metal mesh, 319
mini-baja vehicle, 374
mists, 319
model, 343
modulus of elasticity, 304
mosquito mesh, 319
MTJ, 282
Multiplexer, 294
multiplexor, 294

N

nanoemulsiones, 249
nanoemulsions, 249
neblinas, 319
nieblas, 319
numerical taxonomy, 353

O

orientation system, 367

P

parámetros SAE, 374
Passion fruit, 273
PDP, 294
phase-metric method, 367
PIC, 249
PIT, 249
polyphenols, 273

R

raschel mesh, 319
retardo de tiempo, 294
roughness coefficient, 328

S

SAE parameters, 374
seed oil, 273

sistema de suspensión, 374
spat, 343
spontaneous emulsion, 249
straw bale, 304
suspension system, 374
sustainability, 304

T

Time Delay, 294
transdermal delivery, 249
transistor de efecto de campo de nanotubos de
 carbono, 294
trappermists, 319

U

unmanned aerial vehicles (UAV), 367

V

vehículo Mini Baja, 374

W

water, 343

Índice de autores (*Author index*)

A

Abbasian, Karim, 294
Aguirre, Darío, 304

B

Baghban, Hamed, 294
Bagher Tavakoli, Mohammad, 282

C

Chaharsoughi Amin, Hamed, 353
Cieza-León, Dante, 319
Cieza-León, Luis, 319

D

Díaz-Salas, Abelardo, 328
Duarte-González, David, 343

E

Eshraghi Samani, Roya, 353

F

Fooladvand, Hamed, 294
Franco-Camacho, Omar, 374

G

Grecheneva, A. V., 367
Guevara-Pérez, Edilberto, 328

H

Hasanvandian, Maryam, 353

K

Kharchuk, S. M., 367
Kurilov, I. A., 367
Kuzichkin, O. R., 367

M

Mago-Ramos, María, 374
Monroy, Ruth, 249
Monzó, José María, 304

N

Noguera-Machado, Nirza, 273

O

Ojeda, Luis, 273

P

Pacheco, Franklin, 273
Parvizi, Pooria, 282
Pereira, Juan, 249
Poursaeed, Alireza, 353

R

Ríos, Ricardo, 374
Rosales-Cueva, Juan, 328

S

Sabbaghi-Nadooshan, Reza, 282
Scotti, Emilly, 273
Surzhik, D. I., 367

V

Vásquez-Ramírez, Luis, 319
Vallés-Defendine, Luis, 374
Vasilyev, G. S., 367
Velásquez, Ingrid, 273
Viera, Paulina, 304

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).

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.

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

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, 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 tendientes 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 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 conlleve:

- 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.

Preservación digital

Revista Ingeniería UC utiliza para la preservación digital de sus artículos, el resguardo con archivo comprimido en formato $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, además a través de Marcalyc 2.0 realiza el marcaje obteniendo archivo XML según estándar JATS.

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), 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 filiation, 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.

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.

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) a 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 $\text{\LaTeX}$ 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 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, 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 L^AT_EX 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 L^AT_EX 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 $\text{\LaTeX}$ 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 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 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. Tony Espinoza
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 Curricular

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof.^a Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof.^a Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Jesús J. Jiménez Grimán
Director del Instituto de Matemática y
Cálculo Aplicado

Prof. David E. Duarte G.
Director 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: revistaing@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
Enero–Diciembre 2020, Volumen 27
Número 1–3

Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:
Revenicyt (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