Enero–Abril 2023, Vol. 30, N° 1, ISSN 1316–6832
Online ISSN: 2610-8240

FACULTAD DE INGENIERIA

Revista INGENIERÍA UC

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

Disponible en:
Revista Ingeniería UC

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

VALENCIA – VENEZUELA

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

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

Revista Ingeniería UC

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

Editor - Jefe

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

Editores Honorarios

Prof. Edilberto Guevara, PhD. Vocal of the National Tribbunal 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).✉

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

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

Editores Asociados

Profª. Evelyn Yamal. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Profª. Beatriz Herrera. Dra. Universidad Católica de Leuven, Bélgica. ✉

Profª. Lissette Jiménez. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Corrector de redacción y estilo

Profª. Vanessa Hurtado. M.Sc. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela. ✉

Junta Editorial

Dr. Adelmo Ortiz Conde
Universidad Simón Bolívar, Venezuela. ✉
Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela. ✉
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile. ✉
Dr. Herbertt J. Sira R.
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. ✉
Dr. Enrique Barbieri
University of Houston, Estados Unidos. ✉
Dr. Ángel Rios Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España. ✉
Dr. Merlín Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela. ✉
Dr. José A. Díaz
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉
Dr. Roberto Callarotti
Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. ✉
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

ISSN 1316–6832
Depósito legal pp 92.0200
Online ISSN: 2610-8240
Revista indizada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing); LATINDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR–Matriz de información para el análisis de revista; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ–Directory of Open Access Journals.

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

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 Venezonalo 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
Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela
Lic. Hernando Herrera Mata, M.Sc., Universidad de Oriente, Venezuela
Ing. Carlos Lameda, M.Sc., Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela
Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. William C. Henriquez Guzmán, Universidad de Oriente, Venezuela
Dr. Sergio Pérez Pacheco, Universidad Estatal de Bolívar, Ecuador
Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dra. Lilly Marcano, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela
*Lista parcial

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

Información de Contacto

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

https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707
Correo–e: revistaing@uc.edu.ve
Correo–e: revistaing@gmail.com
Correo–e: adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)

Redes sociales
Twitter: @RevistaIngUC
Instagram: revistainguc

Diseño, Diagramación y Montaje en LaTeX: **Revista Ingeniería UC**, Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

ISSN 1316–6832
Online ISSN: 2610-8240

Revista Ingeniería UC

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica

Facultad de Ingeniería

Universidad de Carabobo

Valencia – Venezuela

Contenido General, *(General content)*

Volumen 30 Número 1 **1**

Editorial **2**

Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales

1 Influencia de la formulación de espumas en medios porosos para procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos

Influence of foam formulation on the porous medium for improved recovery of hydrocarbons

Inés C. Hernández, Juan C. Pereira **3**

2 Procesamiento del complejo PQRST de un ECG usando la base de datos *MIT-BIH Arrhythmia* y su implementación en circuitos electrónicos

Processing of the PQRST complex of an ECG using the *MIT-BIH Arrhythmia* database and its implementation in electronic circuits

Andrea Quintanilla, César Seijas **14**

3 Propuesta para el rediseño de sistemas de aspiración por extracción localizada

Proposal for the redesign of local exhaust systems

Vanessa Hurtado, Francisco Santoro, José Alejandro Gómez, Ángel Almarza–Morales **24**

4 Identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación de suelos en la microcuenca del río Mariño, Abancay Apurímac

Identification of hazard areas due to landslides on slopes due to soil saturation in the Mariño river catchment, Abancay - Apurímac

Guillermo Aguilar & Ángel Maldonado **41**

5 Sistematización de datos para el modelamiento del caudal ecológico y su incorporación en la gestión integrada de los recursos hídricos

Systematization of data for ecological flow modeling and its incorporation in integrated water resources management

Richard Linares-Uzcátegui, Edilberto Guevara-Pérez **53**

6 Nota Técnica. Análisis de prácticas de capas-por-capas usadas en la expansión del poliestireno en operaciones de construcciones residenciales

Tech Note. Analysis of practices of layer-by-layer use of expanded polystyrene in the operation of residential buildings

Arkady Zakharov **70**

Índice de materias **76**

Subjects index **77**

Índice de autores (*Author index*) **78**

Apéndices 1

A. Línea editorial **2**

B. Editorial line **3**

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

D. Ethics and Publication Policies **8**

E. Normas para la presentación de artículos **12**

F. Authors Information **15**

G. Carta de compromiso **17**

H. Compromise letter **18**

I. Índices de Revista Ingeniería UC **19**

FACULTAD
DE
INGENIERIA

Volumen 30 Número 1

Editorial

Presentamos el Volumen 30 Nº 1 de la Revista Ingeniería UC, con una serie de productos de investigación que muestran el rigor científico y los diversos enfoques de la ciencia aplicada como una ruta hacia la resolución de problemas de la actualidad, desde una visión que toca muy de cerca aspectos que impactan de muchas maneras la vida del ser humano.

En tal sentido, abrimos el número con el trabajo de Hernández y Pereira, quienes muestran la influencia de la formulación de espumas en medios porosos para procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos, demostrando por medio de su estudio su aplicabilidad para tales fines, en donde la mayor eficiencia de desplazamiento y recuperación se alcanzó con el surfactante SDS a la concentración de 5,0 %.

Por su parte, Quintanilla y Seijas describen el diseño e implementación por etapa, del circuito electrónico bio-amp del electrocardiograma, tomando en consideración su gran utilidad en la clínica por su fácil disponibilidad y versatilidad. Para lograr un desempeño efectivo en la interfaz de usuario, se toman en cuenta aspectos como: la alta relación de rechazo en modo común, un valor mínimo de frecuencia cutoff de 0,67 Hz, una alta impedancia de entrada y bajo voltaje offset.

Hurtado y sus colaboradores, abordan una ruta sistemática para el rediseño de un sistema de extracción localizada. En ese sentido, se plantean las directrices que encaminan el análisis integral e individual de los componentes que constituyen al sistema de extracción, presentando una estructura para un proceso ordenado y claro soportado en una base de cálculo que considera a cada uno de los elementos del mismo.

Paralelamente, Aguilar y Maldonado, trabajaron en la identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación de suelos en la microcuenca del río Mariño, Abancay Apurímac, mostrando un análisis del problema de los movimientos de masa de tierra a través de un enfoque que integra las condiciones de saturación y los deslizamientos, evaluando la estabilidad de taludes con el uso del programa SINMAP (Mapeo del Índice de Estabilidad). Se logró la identificación del 70,69 % de los deslizamientos de tierra, de un total de 58 inventariados en áreas clasificadas como inestables. La fiabilidad de la simulación fue evaluada mediante un modelo de clasificación de la curva ROC con un 96,7 % de precisión global.

Linares y Guevara, presentan la sistematización de datos para el modelamiento del caudal ecológico y su incorporación en la gestión integrada de los recursos hídricos. Se procesaron 21 modelos de CE que usan registros medios de caudales mensuales y cuatro (4) de caudales medios diarios. La aplicación del modelo QEMR arrojó valores mayores que los caudales mínimos de operación (diario y mensual) en los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre), e inferior a la normativa peruana.

Por último, Zakharov considera el uso del poliestireno como material aislante térmico eficaz en estructuras portantes y de cerramiento de tres capas en edificios residenciales de concreto armado, tomando en cuenta tres aspectos: la dependencia del grado de resistencia a la transferencia de calor del recinto con respecto al método de combinación de poliestireno expandido con materiales estructurales de piedra; la resistencia al fuego y la viabilidad de utilizar muros exteriores para la calefacción por paneles de los edificios.

Agradecemos como es costumbre a los autores que han depositado su confianza en nosotros como medio de divulgación científica y dejamos la invitación abierta para publicar en nuestra Revista Ingeniería UC.

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

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

Influence of foam formulation on the porous medium for improved recovery of hydrocarbons

Inés C. Hernández , Juan Pereira *

Laboratorio de Petróleo Hidrocarburo y Derivados (PHD), Departamento de Química. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.288

Abstract.- The surfactant systems are highly interested in the oil industry due to their multiple technological applications, especially in the improved recovery of hydrocarbons in the deposits. In the present work, heterogeneous micro porous one-dimensional systems were developed to measure the influence of foam injection, using three surfactants at different concentrations (0,1; 1; 5; 10 % m/v). As a result, the highest displacement and recovery efficiency was achieved with the SDS surfactant at the concentration of 5,0 %, obtaining a 70 % yield in extraction compared to the other concentrations evaluated. This result demonstrated its applicability in developing national technologies for enhanced recovery based on foam injection.

Keywords: foam, formulation, improved recovery, surfactants.

Influencia de la formulación de espumas en medios porosos para procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos

Resumen.- Los sistemas surfactantes presentan un alto interés en la industria petrolera por sus múltiples aplicaciones tecnológicas, en especial en los procesos de recuperación mejorada de hidrocarburos en los yacimientos. En el presente trabajo se desarrollaron sistemas unidimensionales micro porosos heterogéneos para medir la influencia de la inyección de espuma, empleando tres surfactantes a diferentes concentraciones (0,1; 1,0; 5,0; 10,0 % m/v). La mayor eficiencia de desplazamiento y recuperación se alcanzó con el surfactante SDS a la concentración de 5,0 %, al obtener un 70 % de rendimiento en extracción, en comparación con las demás concentraciones evaluadas. Este resultado demostró su aplicabilidad en el desarrollo de tecnologías nacionales para la recuperación mejorada en base a la inyección de espumas.

Palabras clave: espuma; formulación; recuperación mejorada; surfactantes.

Recibido: 20 de noviembre, 2022.
Aceptado: 06 de marzo, 2023.

1. Introducción

Los sistemas surfactantes tienen un enorme interés industrial debido a sus múltiples aplicaciones tecnológicas, destacando sus usos como productos auxiliares en la industria de los hidrocarburos [1, 2]. Surge, además, como un prometedor y rentable proceso de recuperación mejorada de crudo al combinar inundaciones de surfactante con inyección de gas para generar espuma, ofreciendo la posibilidad de mejorar la eficiencia de barrido y el control de la movilidad del crudo [3].

La explotación de crudo pesado tradicionalmente comienza con métodos de agotamiento natural y/o drenaje por agua, dando como resultado bajo recobro [4].

De las tres categorías principales de enfoques como técnica de recuperación mejorada (EOR, por sus siglas en inglés), como los son: recuperación térmica, inyección de gas e inyección de químicos. La inyección de vapor ha sido implementada desde los años 50 a través de la estimulación de vapor cíclica (CSS, por sus siglas en ingles), inyección continua o remojo con vapor, y SAGD (drenaje por gravedad asistido con vapor) [5, 6].

No obstante, el alto costo energético asociado a la inyección de vapor para disminuir la viscosidad del crudo en la formación y el costo asociado a la alta producción de CO_2 [7], hacen que las tecnologías

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*jcpereir@uc.edu.ve (J. Pereira)

basadas en vapor sean menos atractivas, por lo que muchas compañías en la industria han estado activamente tratando de encontrar otras alternativas y mejoras tecnológicas de recuperación [8, 9].

Por otra parte, hay que destacar que tanto la inyección de gas e inyección de químicos, han sido uno de los métodos ampliamente utilizados para EOR con las ventajas de operación práctica y bajo costo [10, 11]. Destacando, que los métodos EOR químicos, incluyen principalmente inundaciones de: polímeros, alcalinas, surfactantes, y sus diversas combinaciones, tales como las inundaciones con Alcalinos-Surfactantes Polímeros (ASP) [12, 13]. Por lo tanto, diferentes productos químicos representan diferentes mecanismos para mejorar la recuperación del petróleo [14].

En este trabajo, abordaremos la técnica de inundación de espuma, la cual se ha implementado en las recuperaciones de petróleo y gas durante más de 60 años [15, 16, 17, 18]. Siendo una tecnología prometedora, que utiliza la espuma como medio de desplazamiento [19, 20, 21].

La espuma es una mezcla gas/líquido que contiene grandes cantidades de burbujas de gas distribuidas en una pequeña cantidad de acumulaciones de líquido [16]. Las espumas acuosas tienen la capacidad de superar algunos desafíos de campo críticos asociados con la inyección de gas. Tales como canalización de gas, anulación gravitacional y digitación viscosa, causada por la diferencia del fluido inyectado y propiedades de los fluidos del yacimiento [22, 11].

En numerosos estudios se han discutido los diferentes factores que afectan el rendimiento de la espuma en medios porosos, incluyendo tipos y concentraciones de surfactantes, condiciones del yacimiento, permeabilidad del núcleo, saturación de petróleo, etc. Entre estos estudios destacamos: [23], quienes estudiaron el efecto de la concentración de dodecilsulfato de sodio (SDS) en la textura de la espuma y el comportamiento del flujo en medios porosos.

Hassan [24] quienes investigaron experimentalmente la caracterización de espumas relacionados con EOR, utilizando la técnica inteligente de inundación de espuma asistida por agua (SWAF) incluyendo espumabilidad y estabilidad de la espuma. Dichos procesos fueron examinados utilizando dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2).

Por otra parte, He [25], estableció un modelo de factor de resistencia de la espuma, evaluando la relación de su capacidad de taponamiento (en función de la permeabilidad relativa del gas) y su sensibilidad a los parámetros de cambios (radio del poro, viscosidad del líquido, radio de la burbuja, relación gas-líquido. Mientras que, Xiong [26], evaluó en medios porosos carbonatados, el efecto de diferentes tensioactivos para EOR, en relación con el rendimiento de la espuma, así como también, determinó la formulación óptima, a condiciones de alta salinidad y temperatura.

Li, X., *et al.* [27], desarrollaron un novedoso sistema de espuma aplicado en yacimientos fracturados de baja permeabilidad, que consta de partículas de nano-SiO_2, tixo-solubles en agua polímero trópico (WTP) y dodecilbencenosulfonato de sodio (SDBS). Con la ayuda de la tecnología de resonancia magnética nuclear (RMN).

Teniendo en cuenta de que, un medio poroso es una matriz sólida con poros interconectados. Macroscópicamente, el transporte de espuma se relaciona con la tendencia del fluido a adherirse a la superficie de formación cuando están presentes otros tipos de fluido como la humectabilidad a la roca, reducción de la tensión interfacial y la presión capilar (Pc). Para la espuma, la presión capilar es la diferencia entre el gas y la presión en fase líquida. Yan [28], considera la ecuación generalizada de Young-Laplace y la función de la presión de ruptura para definir a la presión capilar como se muestra en la ecuación (1):

$$P_c = 2\gamma H_m + \prod(h) \tag{1}$$

Donde P_c es la presión capilar, H_m es la curvatura interfacial media de la película, y γ es la tensión superficial. $\prod$ es la presión disjunta de la película. $\prod$ es una función del espesor de la película, (H). Los valores positivos de $\prod$ reflejan las fuerzas netas de película repulsiva, y los valores negativos de $\prod$ indican las fuerzas de atracción netas. La presión capilar depende de la saturación del líquido [29].

De lo anterior, se puede establecer que en un medio poroso impregnado por hidrocarburos el transporte de espuma a través de él va a depender de reducción de la tensión interfacial y/o Pc, o un cambio en humectabilidad de la roca.

No obstante, existen dos métodos para la formación de espuma. En el primero de ellos, un gas previamente disuelto en un líquido se libera por un cambio físico, por lo general por un descenso de la presión o un aumento de la temperatura. En el segundo caso, un aparato mecánico permite introducir burbujas de gas en el seno del líquido, por lo general por agitación violenta o burbujeo [30].

Durante el proceso de formación de espuma las burbujas se amontonan unas sobre otras, formando películas liquidas entre ellas. Estas películas son sometidas a esfuerzos de estiramiento y es indispensable que ellas no se rompan, ya que la espuma se forma a partir de la acumulación de burbujas. Una vez formada la espuma ésta tiende a adsorberse en las superficies o en las interfases al ponerla en contacto con un medio externo [2].

Una vez absorbidas en las superficies, estas moléculas tensoactivas producen un descenso notable de la tensión superficial que puede pasar de 72 mN/m por superficie aire-agua a 30 mN/m para una solución diluida de surfactante, y muchas veces hasta menos. En lo que concierne a las interfases agua-aceite, ciertos productos pueden disminuir su tensión a valores extremadamente bajos del orden de 0,001 nN/m. Entre más se disminuye la tensión más fácil se crea un área superficial o interfacial [30].

Un surfactante es una molécula que busca una interface y químicamente tiene afinidad tanto por el agua como el aceite, lo cual promueve su migración hacia la interfase en dos líquidos, entre un líquido y un gas, entre un líquido y un sólido, pueden cambiar las condiciones existentes [31]. En la Figura 1, se ilustra la acción de los surfactantes sobre el medio poroso.

Los surfactantes son susceptibles de compatibilizar el agua con los aceites permitiendo la formación de estructuras que asocian agua y aceites en una sola fase llamada solución micelar. Esta acción compatibilizadora se denomina solubilización.

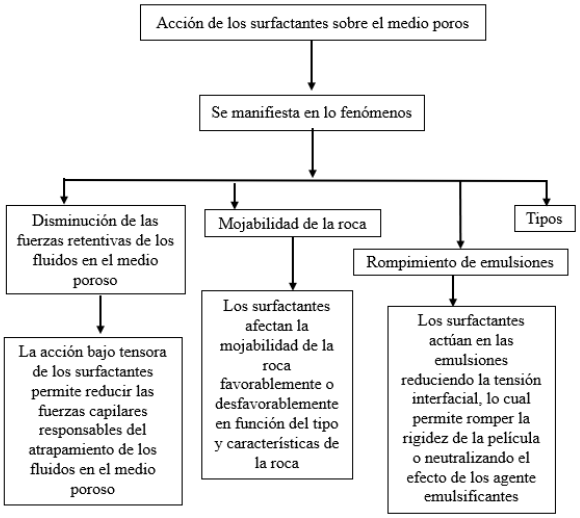


Figura 1: Acción de los surfactantes sobre el medio poroso

En este sentido, en el presente artículo se discutirá la influencia de la formulación de espuma sobre el medio poroso, en función de cómo las inundaciones de surfactantes y gas pueden reducir la tensión interfacial entre el hidrocarburo y el agua, nuestro énfasis está en las propiedades de la espuma (espumabilidad y estabilidad de la espuma) y de ese modo, Se espera que las conclusiones de este documento agreguen información valiosa para identificar las condiciones óptimas, para producir un alto factor de recuperación.

2. Materiales y equipos empleados

Se empleó agua destilada, como fase acuosa (pH 7, conductividad 0,5 μS/cm y tensión interfacial 72 dina/cm).

2.1. Surfactantes

Fueron seleccionados por medio de pruebas de laboratorio para verificar su comportamiento y garantizar que no se produzcan efectos no deseados. En estos estudios se utilizaron los siguientes surfactantes:

- Dodecilsulfato sódico (SDS o NaDS) ($C_{12}H_{25}NaO_4S$), (Figura 2), también conocido como laurilsulfato sódico (SLS), es una molécula que posee un segmento polar y otro apolar. A partir de una concentración

conocida como Concentración Micelar Crítica (CMC), es capaz de auto ensamblarse en micelas [**?**].

El surfactante iónico empleado posee una pureza del 99 %. La concentración micelar critica (CMC) en agua pura a 25 °C es aproximadamente 8,2 mM y el número de agregación es considerado alrededor de 50.

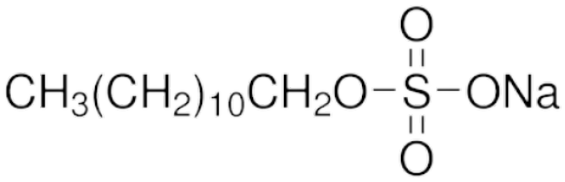


Figura 2: Molécula del Dodecilsulfato sódico (SDS)

- En cuanto al sulfonato de alquilbenceno lineal (en inglés, Linear Alkylbenzene Sulphonate), LAS (o LABS) o dodecilbencenosulfonato de sodio (Figura 3), tenemos que es un tensioactivo aniónico (SDBS).

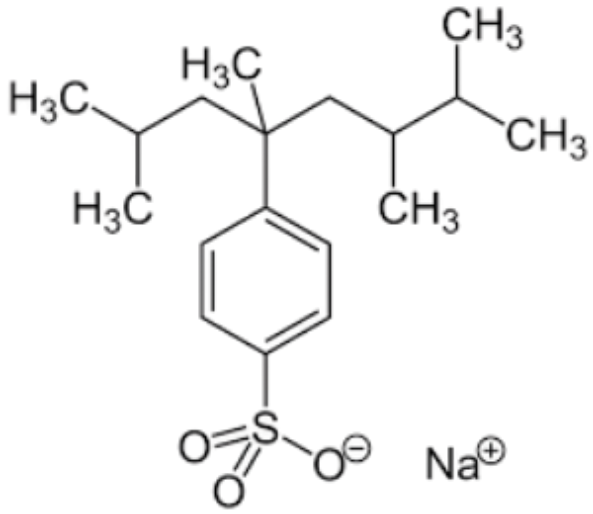


Figura 3: Molécula del Dodecilbencenosulfonato (SBDS)

Los sulfonatos de alquilbenceno lineales [32], son muy solubles en agua, incluso a baja temperatura, tienen muy buena acción detersiva, elevado poder espumante, gran biodegradabilidad, facilidad de procesado y escaso coste de fabricación. Es muy estable y compatible con todo tipo de ingredientes presentes en los productos en los que se emplea. Ello, gracias a su carácter anfipático de sus moléculas, las cuales están formadas por las siguientes partes:

1. Parte polar o hidrófila: la presencia de los grupos sulfonato, SO_3^-, ionizados y con carga negativa, hace que esta parte de la molécula sea soluble en agua.
2. Parte apolar o hidrófoba: la cadena hidrocarbonada (alquílica) no es soluble en agua. Ya que, cuanto más larga sea la cadena, menos soluble es el compuesto. No obstante, cuando disolvemos estos compuestos, se concentran en la superficie del agua, con sus colas hidrófobas hacia fuera y las cabezas hidrófilas disueltas en agua. Esto disminuye la tensión superficial y favorece la limpieza mediante el mecanismo de formación de micelas.

Otra posible organización de estas moléculas cuando están disueltas en agua es formando micelas. Las moléculas individuales se orientan de tal modo que juntan sus partes hidrófugas formando burbujas con esas partes hidrófugas dirigidas hacia el centro, y los restos solubles en agua quedan entonces en la periferia disueltos en el agua. Estas estructuras se denominan micelas. Ayudan a disolver las grasas y otras moléculas no solubles en agua, pues quedan atrapadas en el interior de estas micelas.

- Las aminas etoxiladas: son surfactantes no iónicos formados a partir de la reacción de alquilaminas con óxido de etileno. A continuación, en la Figura 4 se muestra el grupo funcional:

  Estos tensoactivos juegan un papel importante en los mercados de Oil & Gas y Crop Solutions, así como en el procesamiento textil. Actúan como solubilizantes, humectantes, anticorrosivos y adyuvantes [33].

  En esta investigación se usó específicamente, el GENAMINOX (Figura 5), un producto de la línea de productos de Clariant, surfactante

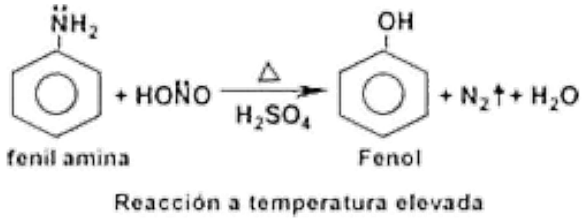


Figura 4: Grupo funcional de las aminas etoxiladas

anfótero, que permite que las formulaciones más eficaces y compatibles con el medio ambiente para los limpiadores de superficie superficial (HSC).

Figura 5: Diluciones del Genaminox empleado

3. Procedimiento experimental

En la Figura 6, se muestra el procedimiento que se siguió para las once (11) pruebas experimentales, realizadas a diversas concentraciones de surfactantes. Procedimiento que se emplea en PDVSA–INTEVEP [34], para realizar pruebas de desplazamiento.

En líneas generales de estos procedimientos se desprenden tres (3) pasos a seguir, los cuales se describen a continuación:

3.1. Acondicionamiento de la celda

Selección del surfactante y preparación de soluciones

La selección de surfactante se hizo de acuerdo con su capacidad espumante y a sus características estructurales. Este paso se realizó paralelamente a la preparación del medio poroso para cada una de las soluciones a las diferentes concentraciones de surfactantes. Como se describe a continuación:

En un vaso de precipitado de 100 mL, se pesó 25,0046 g de SDS a 99,98 % pureza, y se calculó

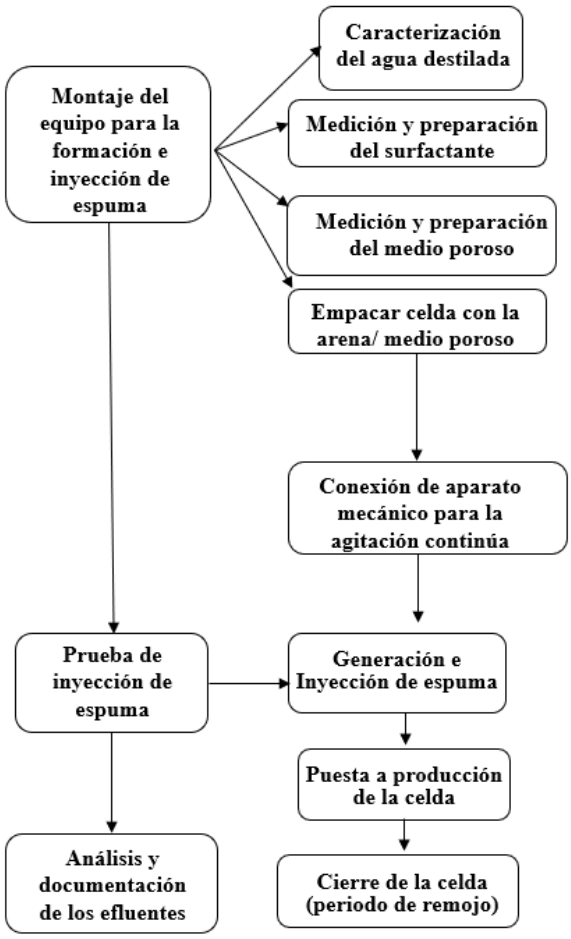


Figura 6: Procedimiento metodológico empleado en el estudio

la cantidad necesaria para lograr la concentración deseada empleando la ecuación (2):

$$\%M/V = \frac{M_{\text{soluto}}}{V} \cdot 100 \qquad (2)$$

Luego, en un balón aforado de 250 mL se le agregó agua destilada hasta el aforo para obtener una concentración en % m/v, se agitó levemente y se dejó reposar la solución por 24 h. De esta forma se obtuvo la concentración de SDS al 10 %.

Partiendo de esta concentración, relativamente alta, se prepararon diluciones a concentraciones de 5 %, 1 % y 0,1 %, para lo cual se trasvasaban la cantidad requerida en cada concentración, calculada mediante la siguiente ecuación (3).

$$C_d V_d = C_1 V_1 \qquad (3)$$

De acuerdo con la ecuación (3), para diluir una concentración del 10 al 5 %, se debe extraer 50 mL de la concentración al 10 % y diluir en 100 mL de agua destilada, dejar en reposo por 24 h, posteriormente aforar.

Este procedimiento se siguió para determinar las soluciones a diferentes concentraciones de los surfactantes SDBS y Amina etoxilada (Genaminox).

Es de acotar, que en el caso del surfactante Genaminox la concentración más alta preparada fue al 5 %, por no disponer de suficiente muestra pura. Todas las mediciones y determinaciones fueron realizadas aproximadamente a 25 °C de temperatura. Ambos pasos, se realizan con la finalidad de preparar el fluido desplanzante.

Medición y preparación del medio poroso

En este paso se mide y se pesa la arena y el hidrocarburo, con la finalidad de empacar la celda para modelar la espuma en los micromodelos.

En un principio, se pesó en una balanza analítica aproximadamente 469 g, de arena de río tamizada, la cual fue lavada con agua destilada (se dejó en reposo durante 24 h), luego se dejó secar por 48 h. Posteriormente, se impregnó y mezcló con 1 % (46,9 g) de hidrocarburo. De este total de muestra, se pesaron 15 g. de la mezcla para realizar cada prueba a diferentes concentraciones para los tres surfactantes.

3.2. Generación de espumas

Esta etapa, se realiza con el propósito de tener las condiciones para que el fluido desplazante este en forma de burbujas, para posteriormente, iniciar la inyección.

Para cada prueba, se introdujo en una columna de vidrio la solución previamente preparada para cada una de las concentraciones de los surfactantes (10, 5, 1 y 0,1 % m/v) al que se le conectó un compresor para el suministro de aire, el cual agitaba continuamente la solución a una presión constante. Posteriormente, se dejó fluir por el extremo superior de la columna de vidrio las espumas para visualmente determinar la cantidad, tamaño, color y consistencia de las espumas generadas.

3.3. Determinación de la influencia de las espumas en el medio poroso para el recobro de hidrocarburos

Para la técnica se dispuso de otra columna de vidrio para cromatografía y un vaso precipitado, además de una cámara digital para la toma de las fotografías y el posterior procesamiento de las imágenes.

Inicialmente, se introdujo en la columna de vidrio una fibra de lana como filtro antes y después de introducir el medio poroso, evitando el desplazamiento de este. Se realizó la prueba 0, o prueba al blanco, con la finalidad de contabilizar la cantidad de hidrocarburo que se encontraba sobresaturado.

Luego, se realizaron las subsiguientes 11 pruebas, a las que se les inyectó y dejó pasar la espuma previamente generada, para consecutivamente, evaluar la interacción entre el medio poroso y la espuma (puesta a producción la celda), posteriormente tiempo de remojo y cierre de celda.

Para la técnica de la pesada del fluido desplazado Vs. recobrado, se trasvasó lo recogido en un tubo de ensayo (emulsión y aceite), se dejó reposar por 24 h. A continuación, se presenta el esquema del equipo construido, (Figura 7).

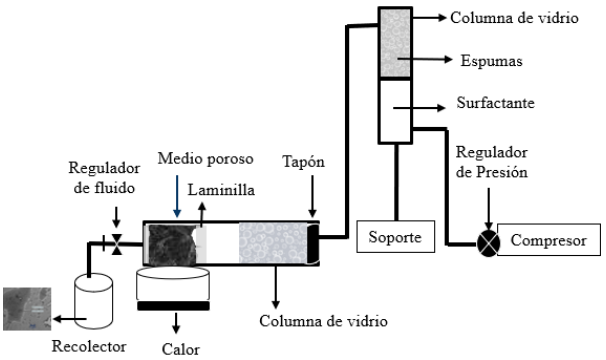


Figura 7: Esquema del equipo construido para generar espuma

Una vez puesto en funcionamiento el equipo construido y mostrado en la Figura 7. Subsiguientemente, mediante la utilización de una propipeta y pipeta Pasteur, se extrajo el volumen de aceite, y finalmente, se pesó para cuantificar el volumen recobrado.

4. Discusión de resultados

Una vez determinado el tamaño de los granos se empaquetó la arena en una celda para modelar el medio poroso con una relación arena/hidrocarburo de 9:1. Relación que se mantuvo constantes para las 11 pruebas.

En la Figura 8, se muestra la imagen microscópica del medio poroso empleado, el cual era de aspecto heterogéneo, con tamaño de granos variables con un rango entre 0,1 y 10 micrómetros, determinado mediante el uso del microscopio.

Figura 8: Imagen microscópica del medio poroso

Una vez desarrollados los sistemas unidimensionales microporosos heterogéneos (acondicionamiento de las celdas), se procedió a realizar la prueba 0, donde el fluido de desplazamiento es agua destilada "experimento blanco". En esta prueba se dejó pasar cierta cantidad de agua destilada al medio poroso previamente saturado de hidrocarburo para contabilizar la cantidad de hidrocarburo que se encontraba sobresaturado (Figura 9).

En la Figura 9, se muestra el procedimiento experimental realizado para la prueba 0, que como se describió anteriormente se dejó pasar agua destilada al medio poroso y al cabo de 1 h y 30 min, se recuperó 0,366 g, considerada como la cantidad de hidrocarburo que quedó libre en el sistema. Paralelamente, se prepararon las concentraciones para cada uno de los surfactantes, cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

Figura 9: Prueba 0. Agua destilada como fluido de desplazamiento

Tabla 1: Concentración para cada uno de los surfactantes

Tensoactivo (g)		Pureza (%)	Volumen	Concentración
SDS	250,046	100	250	10,018
SDBS	10,074	99,99	250	10,024
Genaminox	50,102	Grad. técn.	50	40,296

La finalidad de medir la influencia de la concentración de surfactante en la generación de espuma antes de ser inyectado en el medio poroso.

En líneas generales, la evaluación del micromodelo propuesto en este estudio, para la generación de espuma se hizo por agitación mecánica, interviniendo un conjunto de factores vinculados directamente a la tensión superficial y a su vez, a las fuerzas de cohesión: combinación de fuerzas electrostáticas, de Van der Waals y las fuerzas de diferentes magnitudes dependiendo del estado de la materia. Todo ello, le otorga mayor poder de solubilidad al líquido/gas.

Es por ello que, las espumas generadas, se midieron mediante observación directa, las cuales eran de color blanquecino con diferentes tamaño, forma y textura. Además de ello, se midió la variabilidad del volumen ocupado por la espuma formada en la columna de vidrio contentivo de la solución previamente preparada para cada una de las concentraciones de los surfactantes sometido a agitación continua y presión constante en cada prueba, siendo la concentración de SDS al 5 %, donde se observó mayor detergencia y/o solubilización (Figura 10).

Figura 10: Proceso de generación de espuma empleando el surfactante SDS

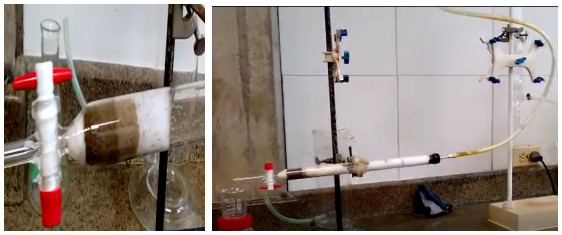


Figura 11: Montaje empleado para la evaluación de las espumas para recobrar hidrocarburos

En la Figura 10, se muestran la columna de vidrio en la que se vertió la solución del surfactante y fue sometida a la inyección de aire, generando espuma con tamaño variable, color blanco, forma esférica, ocupando durante su recorrido el volumen de la columna de vidrio, posteriormente se observa como la espuma atraviesa (solubiliza) el medio poroso y finalmente, se muestra la solución recobrada en un vaso de precipitado. Es de destacar que el tamaño, forma, textura de la espuma variaba en función del surfactante empleado.

En todas las pruebas, los micromodelos se saturaron inicialmente de hidrocarburos, posteriormente, se presurizó a 600 psi, se mantuvo constante el tiempo de desplazamiento (1 h y 30 min) a una velocidad muy lenta aproximadamente 0,01 $cm^3/1h$.

Prueba 1. Surfactante SDS como fluido de desplazamiento en forma de burbujas a una concentración de 0,1 %. Se inició el procedimiento de montaje manteniendo el tiempo y presión constante, los resultados de recobro de hidrocarburo se muestran en la Tabla 2.

En la Figura 11, se muestran los pasos descritos en el procedimiento empleado para las 11 pruebas, iniciando con el montaje del equipo, inyección de espuma, recobro de la muestra de hidrocarburo y emulsión, posteriormente, recolección del hidrocarburo para cuantificarlo.

Subsecuentemente, se realizó el mismo procedimiento para las concentraciones del surfactante SDS al 1 % (prueba 2), 5 % (prueba 3), y 10 % (prueba 4).

Posteriormente, se realizaron las pruebas 5, 6 y 7 al 0,1 %, 1 % y 5 %, respectivamente, modificando el fluido desplazante para la generación de espuma por el surfactante SDBS.

Así mismo, se realizó las pruebas con la amina etoxilada o Genaminox al 0,1 %, (prueba 8) 1 % (prueba 9), 5 % (prueba 10) y 10 % (prueba 11), obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Masa de hidrocarburo recobrado a diferentes concentraciones

	Concentraciones % M/V			
	10	5	1	0,1
SDS	0,9396	1,053	0,2017	0,3617
SDBS	–	0,2016	0,0853	0,3544
Genaminox	0,2868	0,3331	0,1989	0,2105

Posteriormente, estos resultados se graficaron como se observa en la Figura 12, observándose que los desplazamientos realizados con los agentes surfactantes demostraron que a nivel de poro los mejores rendimientos en los experimentos se alcanzaron a una concentración de 5 %.

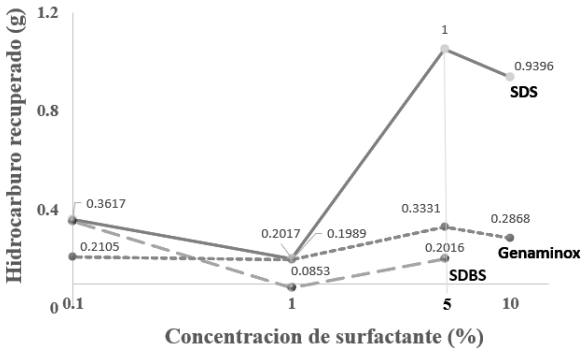


Figura 12: Comportamiento del rendimiento de extracción del hidrocarburo Vs. diferentes concentraciones de surfactantes (SDS, Genaminox y SDBS)

De los desplazamientos realizados con los agentes surfactantes en solución, se infiere que muchas de sus propiedades dependen del tamaño

y número de moléculas, las cuales cambian de forma inusual a diferentes concentraciones. Es decir, está sujeta al tipo de surfactante (iónicos, no iónicos, poliméricos, etc.) así como a la estructura de éste y al ambiente fisicoquímico (presencia de electrolitos, alcoholes, temperatura, etc.). Por ello, al añadir un surfactante a una solución, éste se posiciona en la interfase gas-líquido y en el seno de la solución: por lo que, cuando la concentración de surfactante aumenta, se produce la saturación del área interfacial [35].

En virtud de ello, a partir de cierta concentración, llamada concentración micelar crítica (CMC) ocurre la asociación de las moléculas de surfactantes en agregados coloidales llamados micelas [36], las cuales son las responsables del poder solubilizante del surfactante, lo que es de gran interés en la formación de espuma.

No obstante, desde el punto de vista experimental; de un total de once (11) pruebas evaluadas; tal como se muestra en la Figura 12, el mayor rendimiento de extracción del hidrocarburo a diferentes concentraciones de surfactantes (SDS, genaminox y SDBS), así como también, la mayor eficiencia de desplazamiento y de recuperación, se alcanzó con el surfactante SDS a la concentración de 5 %, al obtener un máximo de 1 g de hidrocarburo, que representó un 70 % adicional aproximadamente, en comparación con las demás concentraciones evaluadas.

Este comportamiento es atribuido a las interacciones electrostáticas que ocurren entre este surfactante y la superficie de la roca. En virtud, a que la estructura molecular del SDS, no tiene anillos aromáticos, de manera tal, que la longitud de la cadena lineal lo hace más eficiente a la ocurrencia de asociación de sus moléculas en agregados coloides, influyendo así, en las propiedades del producto final (afectando la humectabilidad de la roca y disminuyendo la tensión superficial), lo que favorece el desplazamiento del hidrocarburo en el medio poroso, producto de la eficiente solubilización y/o detergencia del SDS.

5. Conclusión

La mayor eficiencia de desplazamiento y recuperación se alcanzó con el surfactante SDS a la concentración de 5 %, al obtener un máximo de 1 g de hidrocarburo, que representó un 70 % adicional aproximadamente, en comparación con las demás concentraciones evaluadas.

Este resultado demostró su aplicabilidad en el desarrollo de tecnologías nacionales para la recuperación mejorada en base a la inyección de espumas y servirá de insumo para futuras pruebas experimentales, para determinar la influencia de los surfactantes analizados sobre las superficies porosas. Estos hallazgos serán útiles para diseñar la inundación de espuma en los procesos EOR de la Faja Petrolífera del Orinoco.

Agradecimientos

Laboratorio de Petróleo Hidrocarburo y Derivados (PHD). Departamento de Química. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología. Universidad de Carabobo. Venezuela.

6. Referencias

[1] G. G. Bernard, L. W. Holm, and C. P. Harvey, "Use of Surfactant to Reduce CO2 Mobility in Oil Displacement," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 281–292, 1980. https://doi.org/10.2118/8370-PA

[2] C. Hill and J. Eastoe, "Foams: From nature to industry," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 247, pp. 496–513, 2017. https://doi.org/10.1016/J.CIS.2017.05.013

[3] Y. Zeng, R. Farajzadeh, A. A. Eftekhari, S. Vincent-Bonnieu, A. Muthuswamy, W. R. Rossen, G. J. Hirasaki, , and S. L. Biswal, "Role of Gas Type on Foam Transport in Porous Media," *Langmuir*, vol. 32, no. 25, pp. 6239–6245, 2016. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b00949

[4] V. Alvarado and E. Manrique, "Enhanced oil recovery: An update review," *Energies*, vol. 3, no. 9, pp. 1529–1575, 2010. https://doi.org/10.3390/en3091529

[5] L. W. Lake, *Enhanced Oil Recovery*, 1 ed. Englewood Cliffs, N.J., USA: Prentice Hall, 1989.

[6] G. Kun, L. Hailong, and Y. Zhixin, "In-situ heavy and extra-heavy oil recovery: A review," *Fuel*, vol. 185, pp. 886–902, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.047

[7] P. Singh and F. Geuzebroek, "Guideline For Development of CO_2 Capture, Transport and EOR Integrated System For UAE," in *The Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*, Abu Dhabi, UAE, 2017. https://doi.org/10.2118/188556-MS

[8] M. K. Liu, A. I. Andrianov, and W. R. Rossen, "Sweep efficiency in CO_2 foam simulations with oil," in *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Vienna, Austria, 2011. https://doi.org/10.2118/142999-MS

[9] S. Sett, S. I. Karakashev, S. K. Smoukov, and A. L. Yarin, "Ion specific effects in foams," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 225, pp. 461–472, 2015. https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.08.007

[10] Y. Zhao, Y. Zhang, X. Lei, Y. Zhang, and Y. Song, "CO_2 flooding enhanced oil recovery evaluated using magnetic resonance imaging technique," *Energy*, vol. 203, p. 117878, 2020. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117878

[11] S. Ahmed, K. A. Elraies, I. M. Tan, and M. R. Hashmet, "Experimental investigation of associative polymerperformance for CO_2 foam enhanced oil recovery," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 157, pp. 971–979, 2017. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.018

[12] S. Liu, D. L. Zhang, W. Yan, M. Puerto, G. J. Hirasaki, and C. A. Miller, "Favorable Attributes of Alkaline-Surfactant-Polymer Flooding," *SPE Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 5–16, 2008. https://doi.org/10.2118/99744-PA

[13] M. Buchgraber, T. Clemens, L. M. Castanier, and A. R. Kovscek, "The displacement of viscous oil by associative polymer solutions," in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, Louisiana, 2009. https://doi.org/10.2118/122400-MS

[14] M. J. Rosen and J. T. Kunjappu, *Surfactants and Interfacial Phenomena*. Hoboken, N.J., USA: Wiley Interscience, 2012. https://doi.org/10.1002/9781118228920

[15] J. F. Casteel and N. F. Djabbarah, "Sweep Improvement in CO_2 Flooding by Use of Foaming Agents," *SPE Reservoir Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 1186–1192, 1988. https://doi.org/10.2118/14392-PA

[16] A. U. Rognmo, N. Al-Khayyat, S. Heldal, I. Vikingstad, Øyvind Eide, S. B. Fredriksen, Z. P. Alcorn, A. Graue, S. L. Bryant, A. R. Kovscek, and M. A. Fern∅, "Performance of Silica Nanoparticles in CO_2 Foam for EOR and CCUS at Tough Reservoir Conditions," *SPE Journal*, vol. 25, no. 1, p. 406–415, 2020. https://doi.org/10.2118/191318-PA

[17] L. Sun, B. Bai, B. Wei, W. Pu, P. Wei, D. Li, and C. Zhang, "Recent advances of surfactant-stabilized N_2/CO_2 foams in enhanced oil recovery," *Fuel*, vol. 241, pp. 83–93, 2019. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.016

[18] S. Li, Q. Wang, and Z. Li, "Stability and Flow Properties of Oil-Based Foam Generated by CO_2," *SPE Journal*, vol. 25, no. 1, p. 416–431, 2020. https://doi.org/10.2118/199339-PA

[19] C. S. Boeije and W. R. Rossen, "SAG foam flooding in carbonate rocks," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 171, pp. 843–853, 2018. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.017

[20] L. Lang, H. Li, X. Wang, and N. Liu, "Experimental study and field demonstration of air-foam flooding for heavy oil EOR," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 185, p. 106659, 2020. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106659

[21] A. Shabib-Asl, M. A. Ayoub, and K. A. Elraies, "A new hybrid technique using low salinity water injection and foam flooding for enhanced oil recovery in sandstone rock," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 174, pp. 716–728, 2019. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.11.035

[22] A. M. AlSumaiti, M. R. Hashmet, W. S. AlAmeri, and E. Anto-Darkwah, "Laboratory Study of CO_2 Foam Flooding in High Temperature, High Salinity Carbonate Reservoirs Using Co-injection Technique," *Energy & Fuels*, vol. 32, no. 2, pp. 1416–1422, 2018. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03432

[23] B. Li, H. Li, A. Cao, and F. Wang, "Effect of surfactant concentration on foam texture and flow characteristics in porous media," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 560, pp. 189–197, 2019. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.027

[24] A. M. Hassan, M. Ayoub, M. Eissa, E. W. Al-Shalabi, A. Almansour, and A. Alquraishi, "Foamability and foam stability screening for smart water assisted foam flooding: A new hybrid eor method. iptc-22475-ms," in *International Petroleum Technology Conference*, Riyadh, Saudi Arabia, 2022. https://doi.org/10.2523/IPTC-22475-MS

[25] M. H. He, Z. Sun, Y. Chen, Y. Hu, X. Li, and Y. Zhou, "Study of plugging capability and seepage characteristics of air foam flooding in low permeability reservoirs," in *SPE Europec, Virtual*, 2020. https://doi.org/10.2118/200605-MS

[26] D. Xiong, "Experimental investigation of foam flooding performance in bulk and porous media for carbonates under harsh conditions," in *The SPE Western Regional Meeting*, Bakersfield, California, USA, 2022. https://doi.org/10.2118/209326-MS

[27] X. Li, X. Chen, Z. Xu, and C. Pu, "A Novel Foam Flooding for Enhanced Oil Recovery in Fractured Low-Permeability Reservoirs: Performance Evaluation and Mechanism Study," *SPE Journal*, vol. 27, no. 4, pp. 2408–2424, 2022. https://doi.org/10.2118/209623-PA

[28] W. Yan, "Foam for Mobility Control in Alkaline/Surfactant Enhanced Oil Recovery Process," PhD Thesis, Rice University, Houston, Texas, 2006.

[29] K. Ma, "Transport of surfactant and foam in porous

media for enhanced oil recovery processes," PhD Thesis, Rice University, Houston, Texas, 2013.

[30] J.-L. Salager, A. M. Forgiarini, R. E. Antón, and L. Quintero, "Available Know-how in Transforming an Emulsified Drilling Fluid to be removed from unwanted location into a low-viscosity Single Phase System," *Energy & Fuels*, vol. 26, no. 7, pp. 4078–4085, 2012. https://doi.org/10.1021/ef300260v

[31] C. Negin, S. Ali, and Q. Xie, "Most Common Surfactants Employed in Chemical Enhanced Oil Recovery," *Petroleum*, vol. 3, no. 2, pp. 197–211, 2016. https://doi.org/10.1016/j.petlm.2016.11.007

[32] W. Wolf and T. Feijtel, "TerrestrialF Risk Assessment for Linear Alkyl Benzene Sulfonate (LAS) in Sludge-Amended Soils," *Chemosphere*, vol. 36, no. 6, pp. 1319–1343, 1998. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)10021-2

[33] E. Smulders, W. von Rybinski, E. Sung, W. Rähse, J. Steber, F. Wiebel, and A. Nordskog, "Laundry Detergents," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007. https://doi.org/10.1002/14356007.a08_315.pub2

[34] Petróleos de Venezuela S.A PDVSA INTEVEP, "Procedimientos metodológicos empleados para las pruebas de desplazamiento," PDVSA INTEVEP, Venezuela, Manual técnico, 2008.

[35] P. Shen, J. Wang, S. Yuan, T. Zhong, and X. Jia, "Study of enhanced-oil-recovery mechanism of alkali/surfactant/polymer flooding in porous media from experiments," *SPE Journal - SPE J*, vol. 14, pp. 237–244, 2009. https://doi.org/10.2118/126128-PA

[36] K. Shinoda, "Shinoda," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 85, no. 22, p. 3311 – 3312, 1981. https://doi.org/10.1021/j150622a021

Processing of the PQRST complex of an ECG using the *MIT-BIH Arrhythmia* database and its implementation in electronic circuits

Andrea Quintanilla [a], César Seijas *[,a,b]

[a] *Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*
[b] *Centro de Procesamiento de Imágenes, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.436

Abstract.- This paper introduces the step-by-step design and implementation of an electrocardiogram electronic bio-amp circuit, hereinafter ECG. Due to being a graphic representation of heart electrical activity, the ECG is interpreted as a sparkled signal with a pointed structure called PQRST complex, corresponding to the depolarization of the heart's ventricles. For the graphic development, a flowchart was used as support where it describes each design step, its differential gain and simulations on frequency response, in an interval of 0,67 Hz to 200 Hz. Altogether, the data collection obtained by the "MIT-BIH: Arrhythmia Database" was used in this study, which consists of 48 data p/30 min each one, according to age and gender in healthy patients. The completed development was executed under several considerations and design criteria, in interpretations and quality of components involved.

Keywords: Bio-amp; cardiac cycle; PQRST complex; ECG; differential gain.

Procesamiento del complejo PQRST de un ECG usando la base de datos *MIT-BIH Arrhythmia* y su implementación en circuitos electrónicos

Resumen.- El presente artículo describe el diseño e implementación por etapa, del circuito electrónico bio-amplificador del electrocardiograma, en adelante ECG. Al ser la representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón, el ECG se interpreta bajo una señal de estructura picuda llamada complejo PQRST, que corresponde a la despolarización de los ventrículos del corazón. Para su desarrollo gráfico, se usó a modo de apoyo un diagrama de flujo donde describe cada etapa de diseño, su ganancia diferencial y sus simulaciones en respuesta en frecuencia, a un intervalo de 0,67 Hz a 200 Hz. En conjunto, se empleó la herramienta de recopilación de datos del "*MIT-BIH: Arrhytmia Database*" que consta de 48 valores por 30 minutos cada una, repartidos en una muestra de pacientes sanos según edad y género. El desarrollo computacional está bajo una serie de consideraciones y criterios de diseño, tanto en las lecturas como en la calidad de los componentes involucrados.

Palabras clave: Bio-amp; ciclo cardiaco; complejo PQRST; ECG; ganancia diferencial.

Recibido: 23 de noviembre, 2022.
Aceptado: 17 de marzo, 2023.

1. Introducción

El impulso o latido cardíaco ocurre de manera espontánea en el nódulo sinusal, se ubica en la parte posterosuperior de la aurícula derecha, en la entrada de la vena cava superior. Este nódulo es una fracción de tejido de forma ovalada, es más conocido como el marcapasos cardíaco natural y está irrigado por la arteria del mismo nombre, que es una rama de la arteria coronaria derecha o de la arteria circunfleja. El nódulo sinusal tiene una gran inervación simpática y parasimpática [1]; y además puede verse influido por consumo de estimulantes (alcohol, nicotina, cafeína, etc.), intoxicación por drogas o por ciertas condiciones tales como la hipoxia.

Para que el funcionamiento del corazón sea posible, cada célula cardiaca debe contraerse coordinadamente respecto del resto. El circuito eléctrico del corazón hace posible esto: lo componen una parte de las células del músculo cardíaco que tienen la particularidad de ser más fácilmente excitables que el resto. Su función es propagar los impulsos eléctricos hacia todos los

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*cseijasfg@gmail.com (C. Seijas)

sectores del músculo cardiaco de modo que el corazón cumpla su función de bombear sangre.

El corazón está compuesto de dos partes casi simétricas, y están aisladas entre sí. Cada una de estas partes está compuesta por dos cámaras interconectadas, una aurícula y un ventrículo. La parte derecha del corazón bombea la sangre que viene del cuerpo hacia los pulmones; mientras que la izquierda cierra el ciclo de trabajo, bombea la sangre ya oxigenada proveniente de los pulmones y fluye hacia el cuerpo, y así sucesivamente. El ventrículo (de mayor tamaño) es la bomba impulsora de la sangre para cada lado del corazón. Las aurículas poseen un funcionamiento similar a la de una válvula reguladora, y por lo tanto deben llenarse un poco antes que el ventrículo correspondiente. Cuando todas las células cardíacas de una cavidad se contraen al mismo tiempo (sístole), esa cámara bombea la sangre que contiene. En cambio, cuando se relaja (diástole) la sangre ingresa en dicha cámara; de este modo un latido está compuesto por una secuencia sístole auricular-diástole ventricular simultáneas, donde la sangre es expulsada de la aurícula mientras se va llenando el ventrículo, seguido a continuación de un período más largo de sístole ventricular-diástole auricular. Los sonidos escuchados durante un latido se deben a las válvulas de la salida de cada cámara.

2. Revisión preliminar

En el nodo sinusal el conjunto de células se excita automáticamente por cada determinado tiempo, y es entonces en donde se produce la frecuencia cardiaca. Este marcapasos tiene más ramificaciones dentro de la aurícula, y al contraerse empieza una secuencia de contracciones sucesivas que van desplazándose por toda la aurícula produciendo la sístole auricular. Como aún las señales no alcanzaron al ventrículo, éste estará relajándose al mismo tiempo (diástole ventricular) [2]. Después, la contracción se propaga a la parte inferior de la aurícula derecha por los llamados fascículos internodales, alcanzando otro nodo llamado aurícula-ventricular (o atrioventricular). Este nodo cumple casi la función de un segundo marcapasos o elemento sincronizador: cuando todas las señales concurren a él, empieza la propagación de las señales a través del ventrículo (o sístole ventricular). Al mismo tiempo la aurícula empezará su diástole, para poder llenarse de sangre para el siguiente bombeo.

Las ondas del periodo del ECG, mejor conocidas como complejo PQRST, aparecen durante el ciclo de polarización miocárdica y sus distancias entre los puntos más relevantes se denominan segmentos, porciones o intervalos. El complejo PQRST, visto en la Figura 1, consiste en una onda P, la porción de onda QRS y la onda T.

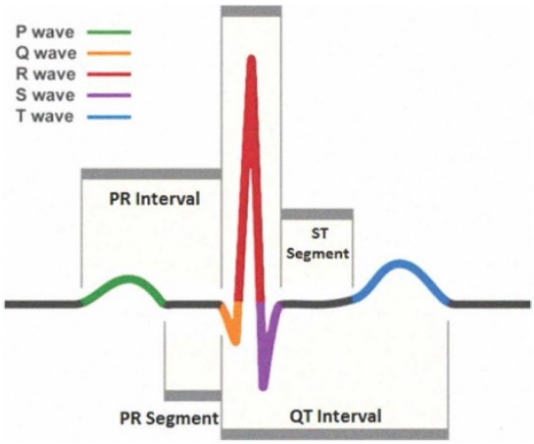


Figura 1: Complejo PQRST

La amplitud, duración y morfología del complejo PQRST, si se les interpreta respectivamente y de manera correcta por un especialista, son útiles para el diagnóstico de arritmias cardíacas, infarto agudo de miocardio, desequilibrio electrolítico, trastornos metabólicos e incluso, mediante el ECG, se podría realizar un seguimiento al comportamiento coronario a los pacientes afectados por el COVID-19 [3].

La señal se divide en tres intervalos importantes, que corresponden con cada evento del latido, posteriormente a describir:

- **Onda P**: Representa la despolarización de las aurículas, primero ocurre en la derecha y luego en la izquierda.
- **Complejo QRS**: Despolarización de los ventrículos. Formada por las ondas Q, R y S, esta porción es la de mayor amplitud y duración del ciclo del espectro ECG en

estado normal. En la señal, la onda Q puede ser normal (fisiológica) o patológica. Para las ondas Q fisiológicas, en caso de que se presenten, representan la despolarización del septo o tabique interventricular.

- **Onda T**: Conocida como "onda lenta T", representa la repolarización de los ventrículos y tiene el mismo sentido que la porción QRS.

Por último, se tiene la onda U, que representa la deflexión (generalmente positiva) que sucede a la onda T y precede la onda P. Esta señal es de magnitudes muy bajas y su visibilidad depende de la frecuencia cardiaca del paciente, es por ello que para este trabajo no se tomará en cuenta su lectura.

En el ECG estándar se emplean 12 derivaciones con la finalidad de registrar los datos necesarios para su realización. Se apoyan en contacto superficial con el paciente y se distribuyen en dos grupos de la siguiente manera: 6 electrodos periféricos (se incluyen las extremidades), y los restantes 6 en la región precordial. Para obtener una correcta interpretación de la señal directamente desde el equipo de visualización se debe conocer en estricto rigor el punto de ubicación de cada electrodo, de manera de inducir al individuo un diagnóstico médico adecuado ya que, de lo contrario, se pueden producir variaciones que pueden perturbar la onda.

3. Metodología

En esta sección se describen tanto la morfología del complejo PQRST como la implementación de su circuito electrónico, en conjunto con las herramientas computacionales que hacen posible la interpretación de la representación gráfica (respuesta en frecuencia), que se tiene por cada etapa del diseño circuital.

Tanto el diseño como las simulaciones en respuesta en frecuencia, fueron posibles de realizar mediante el software libre LTspice XVII (https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html).

3.1. Comportamiento de la señal ECG

Dada su periodicidad con la frecuencia fundamental determinada por el latido del corazón, la señal del complejo PQRST satisface las condiciones de Dirichlet para que se exprese matemáticamente mediante series de Fourier. Los intervalos y/o puntas de la señal se representan por formas de onda y en versiones desplazadas y escalares:

- Intervalo QRS, peaks Q y S: Representadas por formas de onda triangular, respectivamente.
- Peaks P, T y U: Representadas por formas de onda sinusoide.

Las señales de muestra a utilizar forman parte de la base de datos "*MIT-BIH: Arrhythmia Database*" propiedad del MIT, que trabajó en conjunto con la American Heart Association, por sus siglas AHA, y que resultó ser conveniente en términos de efectividad [4]. Consta de 47 registros a una duración de media hora cada uno y realizado a 25 hombres y 22 mujeres. Este compendio se puede obtener en la plataforma PhysioNet. Esta plataforma está a libre disposición web y tiene por objeto realizar levantamiento de datos e investigaciones de diferentes señales fisiológicas, recopilados por la comunidad internacional para así, contrastar los resultados obtenidos de una manera objetiva. Para efectos de este estudio, las simulaciones se realizaron con base a 72 pulsaciones/minuto del corazón humano, y en los ajustes se definieron los valores para cada punta de la onda PQRST, mostradas en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Amplitudes asignadas por cresta de la señal

Cresta	Amplitudes [mV]
P	0,25
Q	0,025
R	1,6
S	0,25
T	0,35

En el caso de los valores mostrados en la Tabla 2, la porción P se medirá a un valor constante de 0,09 s; en el intervalo P-R se seleccionó un valor de 0,16 s; y al intervalo Q-R-S, un valor de 0,11 s.

3.2. Diseño circuital

En la integración por etapa del circuito electrónico, se usó como orientación el siguiente

Tabla 2: Duración por intervalo de la señal

Porción de señal	Rango por intervalo [s]
P	0,09
P-R	0,12 – 0,20
Q-R-S	0,06 – 0,12
S-T	0,18

diagrama de bloque mostrado en la Figura 2. Describe el orden del montaje circuital a realizar, obteniendo al final de cada una las respuestas en frecuencia según con los parámetros establecidos. Empieza con una entrada diferencial, luego un amplificador de instrumentación seguido por una serie de filtros, cada una con una función específica, que se explicarán más adelante.

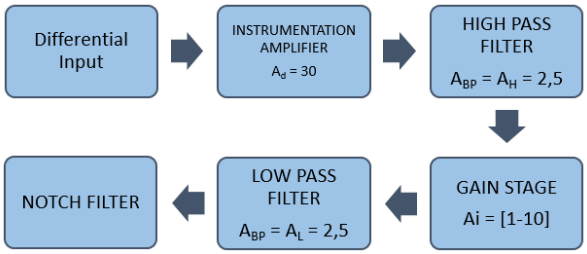


Figura 2: Diagrama de bloques del bio-amplificador del ECG

La primera etapa del bio-amplificador (entrada diferencial) corresponde a las actividades fisiológicas involucradas. La Figura 3 representa el registro del complejo PQRTS, contempla una fuente de voltaje de pulso PWL en función de una recolección de valores de tiempo de la señal PQRST a 48 s; la duración de cada ciclo es de 2 s por lo tanto se grafica a 24 ciclos. Dicha fuente se conecta en serie con una fuente de voltaje de corriente alterna, de onda sinusoidal de amplitud 120 μV a 60 Hz, donde este último representa el ruido producido por los artefactos eléctricos, dando el acoplamiento capacitivo de las corrientes de desplazamiento.

Es importante incorporar la respiración del individuo ya que interfiere directamente en la lectura final del PQRST, incluso se pueden interpretar las señales de respiración derivada (EDR) a partir de un ECG [5]. La Figura 4 la detalla como una señal de pulso en un circuito RC en serie, sujeto a un tiempo de relajación τ de 0,15 s.

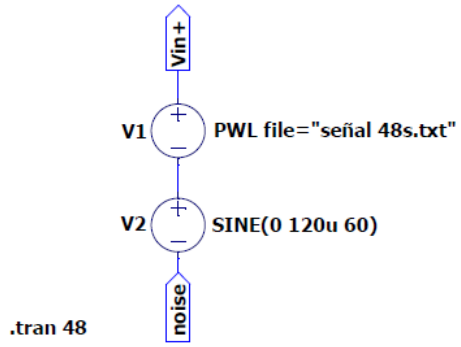


Figura 3: Componentes de tensión en serie

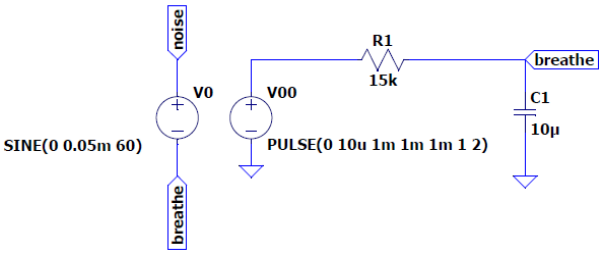


Figura 4: Representación circuital para la respiración

En la segunda fase, se empleó un amplificador de instrumentación modelo LT1167 [6], alimentado por una fuente de entrada de 5 V, y está conformado internamente por tres amplificadores operacionales (op-amp) de la siguiente manera: dos de entrada, que operan como protección para sobrevoltajes, y un tercero para la amplificación total de la señal a la salida. Este modelo empleado es de baja potencia y se emplea una alta ganancia diferencial $A_d = 30$ según la Figura 5, necesario para poder amplificar la frecuencia cardiaca por ser de valores muy bajos. De acuerdo con el modelo seleccionado según la ecuación (1), se obtuvo la resistencia de entrada R_g:

$$A_d = 1 + \frac{50\,\text{k}\Omega}{R_g} \tag{1}$$

Siendo $R_g = 1{,}72\,\text{k}\Omega$

Para la reducción de la tensión del modo común debido a la interferencia y a su vez, proporcionarle resguardo de peligro al individuo en caso de presentarse altos picos de voltaje, se emplea una resistencia de valor considerable, igual o ligeramente menor a 10 kΩ, como se muestra en

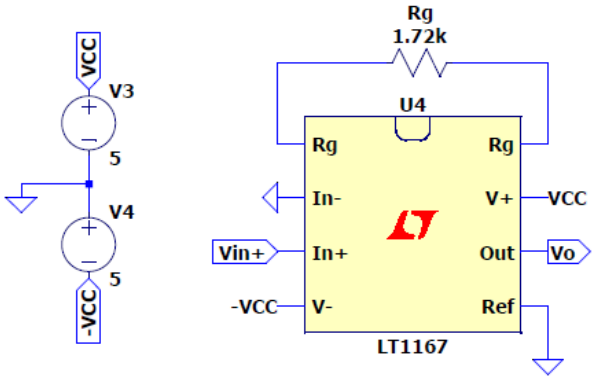


Figura 5: Amplificador diferencial modelo LT1167

la Figura 6. Debe ir conectada en la pierna derecha, evitando cualquier protuberancia ósea.

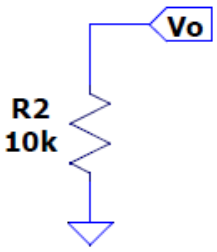


Figura 6: Diseño para la conexión en la pierna derecha

En la tercera fase, el filtro pasa-bandas es el adecuado para la atenuación del ruido que se pueda presentar en la señal a interpretar, tales como el ruido en DC producido por el contacto superficial entre un electrodo y el paciente. Este tipo de filtros permite la mejora en la relación señal/ruido, utilizando bajos umbrales de detección, por lo que se aumenta la sensibilidad. En un ECG convencional, el ancho de banda por lo general tiene un rango de 0,05-150 Hz para pacientes adultos, sin embargo, para este trabajo se diseñó el filtro para un rango de 0,67-200 Hz, donde los valores tanto mínimo como máximo de frecuencia de corte (*cutoff*) son recomendados por la AHA [7]. El paso-bajo de ganancia $A_{BP} = 2,5$ se implementó con el tipo de filtros célula *Sallen-Key* y los polinomios de *Butterworth* [8], ya que, se busca obtener una respuesta en frecuencia lo más plana y estable posible, además de que ofrece una buena respuesta cuando se le introduce señales pulsantes de entrada. En este caso, serán dos filtros activos que compondrán al filtro pasa-bandas, ambos de segundo orden, proporcionando una tasa de caída de -40 db/década, identificados como amplificadores no inversores y analizados de forma independiente. La ganancia anterior A_{BP} aplica en general para los dos filtros activos a calcular: un filtro paso-alto (ganancia $A_{PH} = A_{BP}$) y un filtro paso-bajo (ganancia $A_{PL} = A_{BP}$), que se conectan en cascada y en ese orden, que los une un amplificador no inversor, cada uno con su frecuencia de corte, correspondientes a los valores mínimo y máximo del rango estimado.

Para el diseño de ambos filtros se estableció que los valores tanto para sus resistencias como para sus capacitancias serán de igual magnitud, respectivamente. Entonces, para el filtro paso-alto se seleccionó un valor capacitivo comercial de $C = 100\,\mu$F y, para el filtro paso-bajo, un valor capacitivo comercial $C = 0,1\,\mu$F. Posteriormente, se obtuvieron las resistencias de acuerdo con las frecuencias de corte mínima y máxima. Estos valores están resumidos en la Tabla 3.

Con el método de *Butterworth* y aplicado por igual a ambos filtros, se desea mantener la estabilidad a partir del polinomio de segundo orden expresado a partir de las ecuaciones (2) y (3).

$$H(s) = s^2 + 1,4142 \cdot s + 1 \tag{2}$$

$$2\delta = 3 - H_0 \tag{3}$$

Donde:
H_0: Ganancia máxima
δ: Factor de amortiguación.

A partir de (2) y (3):

$$2\delta = 1,4142 \therefore$$
$$H_0 = 3 - 1,4142 \approxeq 1,586$$

Con la ganancia máxima H_0 se obtienen las resistencias R_3 y R_4:

$$H_0 = 1,586 = 1 + \frac{R_3}{R_4} \therefore$$
$$R_3 \approxeq 6,102\,\text{k}\Omega \wedge R_4 \approxeq 10,402\,\text{k}\Omega$$

Tabla 3: Valores R y C para el filtro pasa-bandas

Filtro	Frecuencia de corte [Hz]	C [μF]		R[$k\Omega$]	
Paso-bajo	200	Cpl	0,1	Rpl	7,957
Paso-alto	0,67	Cph	100	Rph	31,830

Se emplean estos valores por igual en ambos circuitos, su diseño se muestra en las Figuras 7 y 8 respectivamente.

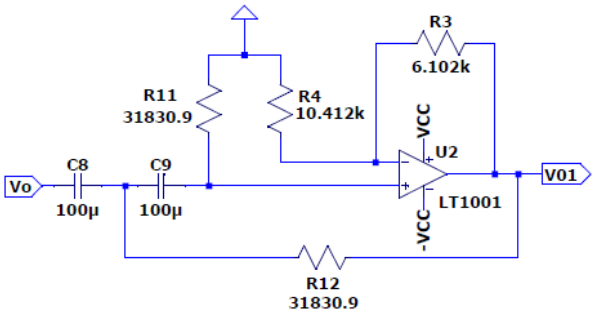


Figura 7: Filtro pasa-alto de segundo orden

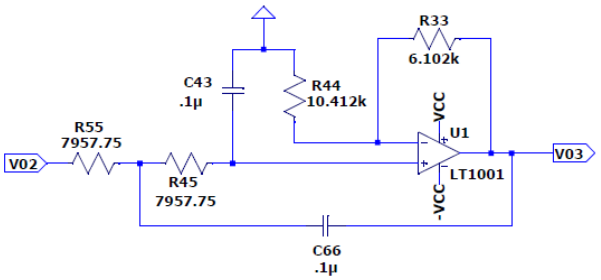


Figura 8: Filtro pasa-bajo de segundo orden

En medio de la cascada de los filtros activos se tiene un amplificador no inversor, posicionado a la salida del filtro pasa-altos y a una ganancia a seleccionar del rango $A_i = [1 - 10]$ (ecuación (4)). Se empleó la ganancia máxima de $A_i = 10$ y su diseño se muestra en la Figura 9:

$$A_i = 10 = 1 + \frac{R_6}{R_5} \qquad (4)$$
$$R_6 = 18\,\text{k}\Omega \wedge R_5 = 2\,\text{k}\Omega$$

En la tercera etapa, se conectó el filtro rechaza-banda *NOTCH*. El *NOTCH*, visualizado en la Figura 10, rechaza una frecuencia determinada que esté interfiriendo en un circuito, de manera de entregar a la salida la señal libre de distorsiones.

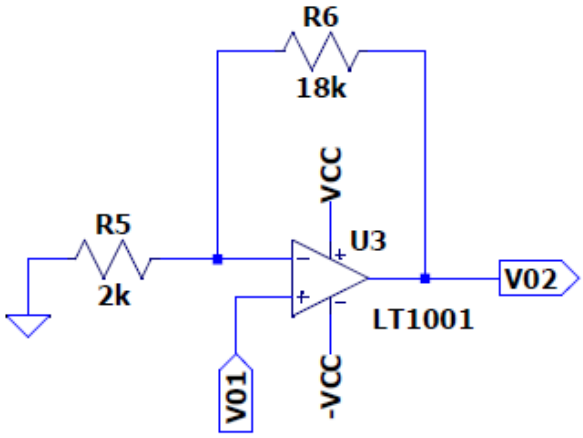


Figura 9: Op-amp

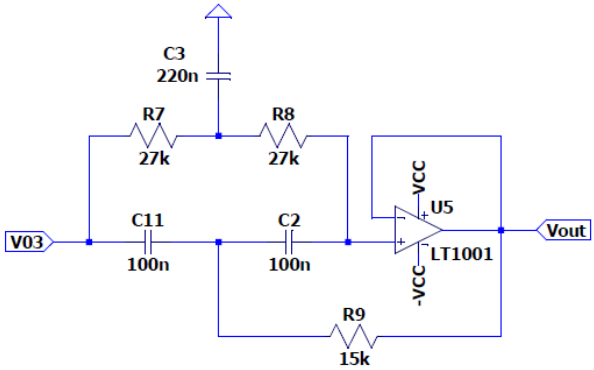


Figura 10: Filtro *NOTCH*

El ECG está expuesto a diversos ruidos que alteran su lectura: primero, las señales producidas por las funciones biológicas del paciente y que pueden tener amplitudes similares a las producidas por el corazón, y segundo, las señales de origen técnico, tales como las interferencias de acoplamiento capacitivo, proveniente de dispositivos que emiten ruido a través de la línea de alimentación doméstica de 60 Hz. Los componentes R y C se obtuvieron a partir de esta frecuencia no deseada y se consideraron valores superiores a los calculados, entonces $C = 100\,\text{nF}$ y luego, $R \approx 27\,\text{k}\Omega$, comprobándose que la ganancia es semejante a la unidad. Se calcularon C_f y R_f a partir de los valores

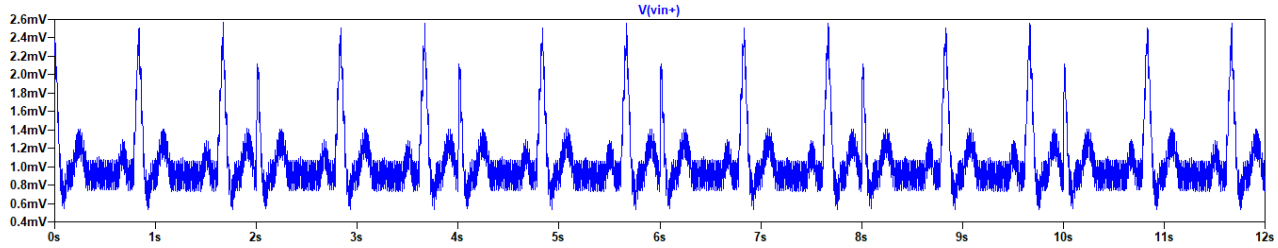


Figura 11: Complejo PQRST en individuo sano

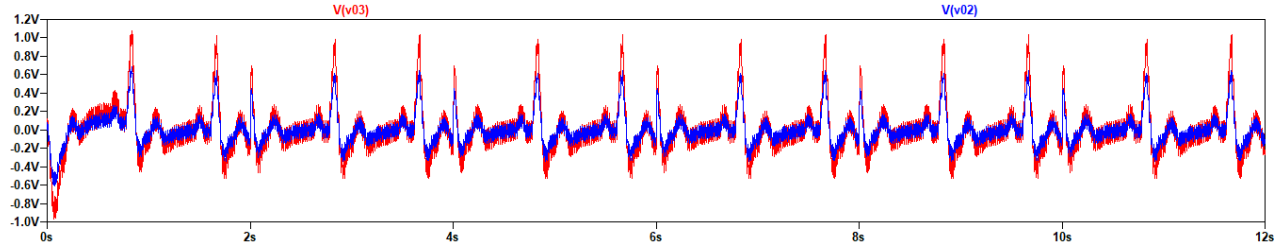


Figura 12: Señales a la salida del filtro paso-alto (azul), y el filtro paso-bajo (rojo)

comerciales escogidos según la ecuación (5).

$$C_f = 2C = 200\,\text{nF} \wedge R_f = \frac{R}{den} \approx 15\,\text{k}\Omega \qquad (5)$$

4. Análisis y discusión de resultados

Según los requerimientos de cada etapa, posteriormente se les realizaron las simulaciones en LTspice XVII, tanto las señales del circuito como sus respuestas en frecuencia, todas basadas en un tiempo de 48 s. Para una mejor visualización, en este trabajo las imágenes a continuación mostrarán las señales en un cuarto de ciclo, es decir, con una duración de 12 s.

La Figura 11 representa el complejo PQRST, como señal electrofisiológica que ingresa en la fase 1 del diseño, sus amplitudes están en el orden de los mV.

En la Figura 12, se destacan las señales a la salida de los filtros paso-alto, dibujada en color azul, y paso-bajo, en color rojo. Se simuló la señal del filtro paso-alto a la salida del amplificador no inversor, ya que por sí sola no se podría visualizar en comparación con su contraparte.

Sin embargo, se realizó un diseño alternativo con respecto al amplificador no inversor de acuerdo a las diferentes ganancias A_i de operación, señalada en la Figura 13, donde en la Figura 14 se visualiza un extracto de las señales en conjunto. La señal muy picuda (dibujada en color azul) es producto de haber seleccionado la ganancia más alta, $A_i = 10$. La Figura 15 muestra las señales, pero a una duración de 12 s.

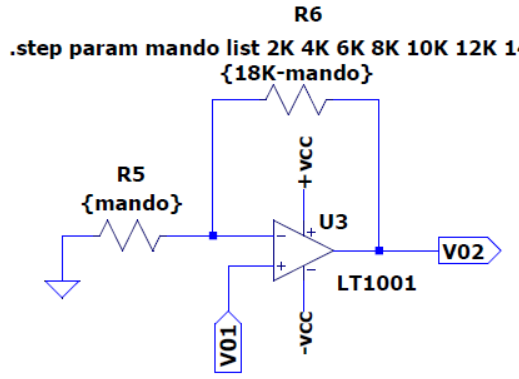


Figura 13: Op-amp de acuerdo a las ganancias A_i

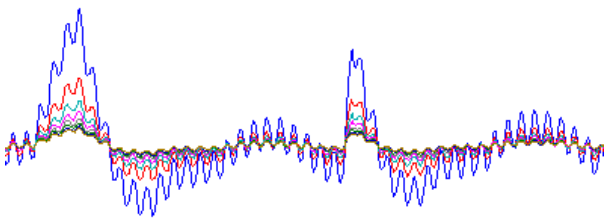


Figura 14: Extracto de señales por cada ganancia A_i

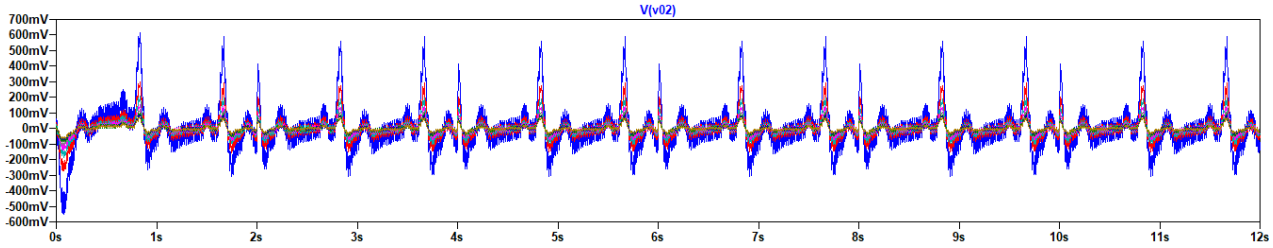


Figura 15: Espectro completo de señales según su ganancia A_i

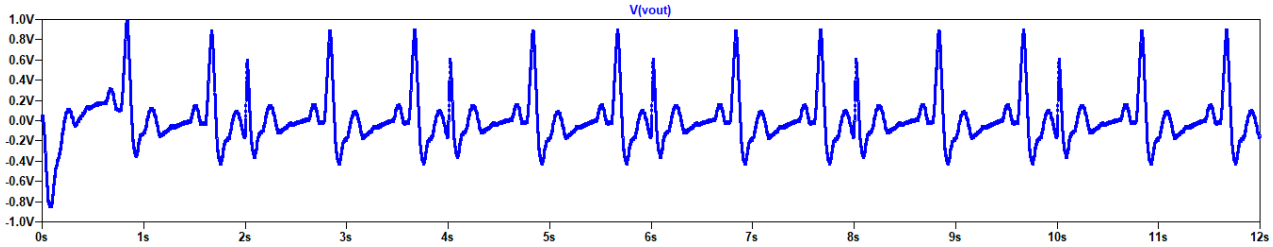


Figura 16: Complejo PQRST a la salida del *NOTCH*

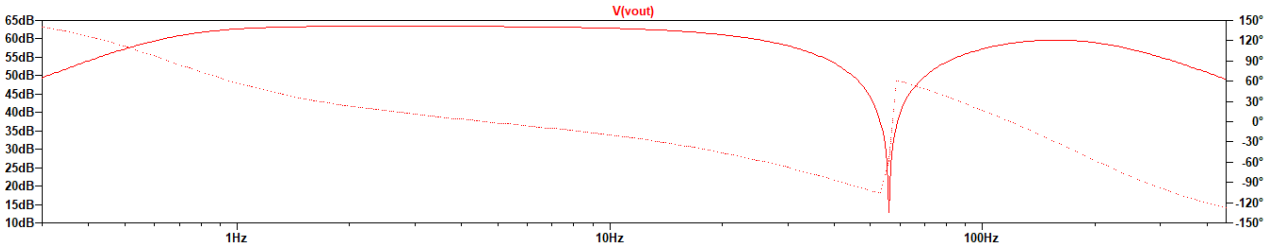


Figura 17: Diagrama de Bode del *NOTCH*

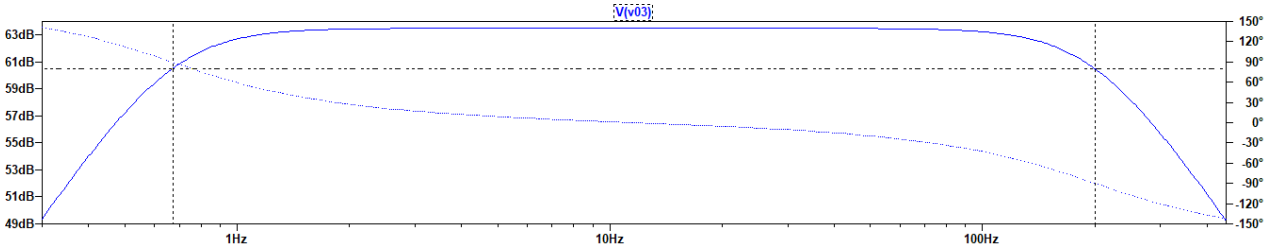


Figura 18: Diagrama de Bode del filtro pasa-bandas

En la última fase, correspondiente al filtro NOTCH, se obtiene nuevamente el complejo PQRST pero menos espigado en comparación con su registro original, en virtud de la ausencia del ruido de las líneas en 60 Hz, lo cual se visualiza en la Figura 16. En conjunto con lo anterior, se obtuvo su diagrama de Bode del filtro según la Figura 17, cumpliéndose así el rechazo buscado. De igual manera ocurre con el diagrama de Bode del filtro pasa-bandas, mostrada en la Figura 18, donde se visualiza la señal plana y demarcada por las frecuencias de corte acorde al diseño, ambas con una magnitud cercana a los 60,5 dB y una fase de 89,31°.

La ganancia total A_f del diseño debe estar comprendida en el rango de 200-2000, y se obtiene por el producto de las ganancias de cada etapa a partir de la ecuación (6):

$$A_f = A_d \cdot A_{BP} \cdot A_i = 750 \qquad (6)$$

Lo cual cumple con el criterio de la ganancia

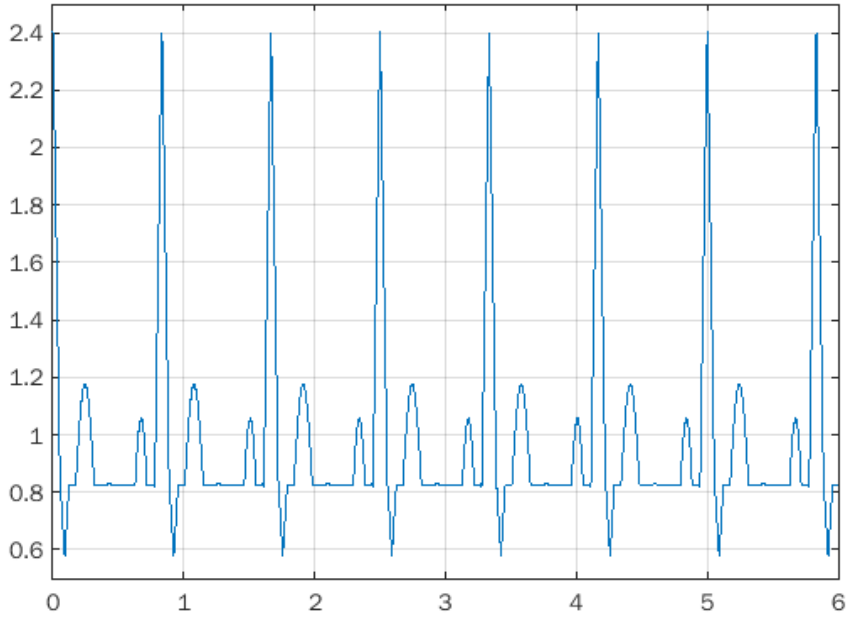


Figura 19: Algoritmo de la señal PQRST acorde a los parámetros por intervalo

ajustable determinada A_f.

La Figura 19 corresponde al algoritmo del complejo PQRST, acorde a los valores asociados a las Tablas 1 y 2. La representación gráfica del algoritmo es similar al de la Figura 12 y se realizó con una duración de 6 s, a modo de poder visualizar fácilmente la señal.

5. Conclusiones

El ECG resulta de gran utilidad en la clínica por su fácil disponibilidad y versatilidad, así como por su naturaleza no invasiva. En este trabajo se desarrolló la electrónica del ECG además del uso de software de simulación para su respuesta en frecuencia, y posteriormente la programación del algoritmo, teniendo finalmente la ganancia total deseada. Para lograr un desempeño efectivo en la interfaz usuario, se sugieren tener en cuenta las siguientes consideraciones tanto en el circuito como en sus simulaciones:

- Se consideró la alta relación de rechazo en modo común.
- Valor mínimo de frecuencia cutoff de 0,67 Hz, para obtener buen comportamiento en el filtrado paso-alto.
- Alta impedancia de entrada.
- Uso del amplificador de instrumentación, por su baja potencia y exactitud en aplicaciones médicas, y exhibir bajos voltaje "*offset*" y bajas corrientes de polarización de entrada.
- Para los filtros se recomienda usar capacitores, preferiblemente, de tecnología basada en poliéster y nunca emplear capacitores electrolíticos, debido a la excesiva tolerancia (solo sugeridos para regulación en las fuentes de alimentación).
- Igualmente a la anterior, aplica para los resistores, recomendados de película metalizada con una tolerancia al 1 %.
- Utilizar componentes pasivos con un consumo de ¼ o ½ W.
- Bajas corrientes de polarización de entrada.
- Imperativo el uso del circuito de protección contra sobrevoltajes.

6. Referencias

[1] S. Urbano-Cerda, H. Fuentes-Barría, V. Vera-Aguirre, C. González-Wong, y R. Aguilera-Eguía, "Variabilidad del ritmo cardiaco e índices antropométricos en hombres universitarios de Santiago de Chile," *Universidad y Salud*, vol. 23, no. 3, pp. 284–290, 2021. https://doi.org/10.22267/rus.212303.242

[2] L. G. Cortés, "Estudio de la señal respiratoria derivada del ECG en función de la posición en sujetos sanos,"

Trabajo final de grado en Ingeniería Biomédica, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2019.

[3] V. Polat, E. Bozcali, K. Yasar, H. Karaosmanoglu, and I. Akturk, "Relationship between right ventricular strain signs in Electrocardiogram and levels of biomarkers associated with COVID-19 pneumonia severity," *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, vol. 117, no. 4, pp. 728–736, 2021. https://doi.org/10.36660/abc.20200724

[4] A. Khalaf and S. Mohammed, "Verification and comparison of MIT-BIH arrhythmia database based on number of beats," *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 4950–4961, 2021. http://doi.org/10.11591/ijece.v11i6.pp4950-4961

[5] J. Jang, "Caracterización de la señal respiratoria a partir del electrocardiograma en sujetos sanos," Trabajo final de grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automatización, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2019.

[6] L. T. Corporation, "LT1167: Single Resistor Gain Programmable, Precision Instrumentation Amplifier Data Sheet," LT1167 datasheet, 2011.

[7] F. Perdigón, L. Vázquez, C. C. Filho, M. Guimarães, J. Evangelista, and C. Román, "Baseline wander removal methods for ECG signals: A comparative study," *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 14, no. 1, pp. 79–109, 2020.

[8] A. Hambley, *Electrónica*. Madrid, España: Pearson Educación, 2001.

Proposal for the redesign of local exhaust systems

Vanessa Hurtado [a], Francisco Santoro [a], José Alejandro Gómez [a], Ángel Almarza–Morales *[,b]

[a] *Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*
[b] *Departamento de Computación, Estudios Básicos de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.*

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.459

Abstract.- This paper establishes a method focused in an exhaustive diagnosis guide for the subsequent design phase. The methodology is focused in local exhaust systems with tapered ducts and fabric collectors as the filtration component. The "redesigning task" may present higher levels of uncertainty that the development of a new model given the diverse factors implied in the use of existing resources; sometimes, those are already installed and operating. With the aim of settling guidelines that direct the comprehensive analysis of the system and its components, a framework is proposed for a structured and straightforward process. This process takes into account calculations over each of the system components, by this mean, qualitative and quantitative design variables are combined for a detailed analysis. Also, it is considered a graphic method for pressure loss calculations as an instrument to analyze the system through time.

Keywords: Bag house filter; powder material; redesign; local exhaust system; fabric collector.

Propuesta para el rediseño de sistemas de aspiración por extracción localizada

Resumen.- El presente trabajo desarrolla un método enfocado en establecer una guía de diagnóstico para una posterior etapa de diseño. La metodología se enfoca en sistemas de extracción de diámetro progresivo que disponen de separadores de tejido como elementos de filtración. La labor de "rediseñar" puede presentar mayores incertidumbres que un nuevo prototipo dada la variedad de factores derivados de utilizar herramientas ya existentes; en muchos casos, inclusive actualmente instaladas y ya en operación. Con el objetivo de plantear directrices que encaminen el análisis integral e individual de los componentes, se presenta una estructura para un proceso ordenado y claro soportado en una base de cálculo que considera a cada uno de los componentes. De esta forma se combinan elementos cuantitativos y cualitativos de diseño para un análisis detallado. Asimismo, se considera un método gráfico para los cálculos de caída de presión como instrumento de análisis del sistema en el tiempo.

Palabras clave: filtro de mangas; material particulado; polvos; rediseño; sistema de aspiración; extracción localizada.

Recibido: 07 de enero, 2023.
Aceptado: 24 de abril, 2023.

1. Introducción

Los sistemas de extracción localizada se basan en el principio de la eliminación de contaminantes generados en un área, mediante el barrido de un espacio con grandes cantidades de aire, o muy cerca, de su origen.

La función de un sistema de extracción es la de evitar la dispersión, pérdidas y acumulación de material. La presencia de polvo en el aire representa una clara contaminación del medio, teniendo en cuenta que el material puede aportar características nocivas para el ser humano y los equipos [1]. Los sistemas de extracción se fundamentan en el movimiento del material suspendido en un flujo de aire, entre distancias horizontales y verticales.

En este sentido, Buchelli y Reinoso [2] destacan la importancia de la verificación del cumplimiento de normativas vigentes sobre medioambiente y el estudio de los parámetros característicos del

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)

material a desplazar, como la velocidad de captura y transporte, el sistema colector de polvo y la potencia del ventilador. Paralelamente, Carmona [3], coincide en el hecho que los sistemas de extracción son de vital importancia desde el punto de vista de la seguridad y salud en el medioambiente de trabajo, y por tanto requieren un riguroso detalle en términos de su diseño y validación.

En cuanto al diseño de un sistema de extracción, Serrano [4] recomienda que la maquinaria se mantenga en su lugar dentro de la planta, ya que el movimiento de esta puede implicar el cambio total del sistema de tuberías lo cual afecta sustancialmente los costos del proyecto. Por su parte, Zarei y sus colaboradores [5] expresan que el estudio y diseño de este tipo de sistemas debe basarse en principio en los estándares sin dejar de lado la eficiencia económica, teniendo como norte el control de contaminantes.

Chitaru y colaboradores [6], expresan que la optimización de un sistema de aspiración existente puede ejecutarse empleando CFD (Diseño asistido por computador) para evaluar y ponderar la efectividad de las opciones de mejora que se propongan, teniendo como premisa la importancia de estas soluciones para la salud en el medioambiente de trabajo.

2. Metodología

El proceso que permite abordar la problemática de un sistema de extracción que no satisface las características para las cuales fue diseñado en principio o que ha sido alterado en su configuración de forma improvisada, generando por un lado pérdidas que afectan la productividad y paralelamente efectos nocivos para la salud de los trabajadores, consiste en llevar a cabo una serie de etapas secuenciales y lógicas para abordar sistemáticamente cada uno de los elementos constitutivos del sistema de extracción, elaborando un diagnóstico y analizando las opciones de mejora

En principio, debe efectuarse la caracterización del producto que se maneja, atendiendo a dos parámetros claves que permiten la extracción del material particulado presente en el aire sin afectar el proceso productivo en cuestión, que son el tamaño y diámetro de la partícula. Es decir, las partículas susceptibles al proceso de extracción son aquellas que se encuentran suspendidas.

En base a estos parámetros se sigue la siguiente ruta:

2.1. Fase I. Diagnóstico

El diagnóstico es una fase clave en el rediseño. El éxito del nuevo sistema depende del análisis detallado de las características del sistema previo, las condiciones iniciales de operación y los problemas que se estén presentando. El diagnóstico de un proceso de rediseño debe ser: integral, porque considera todos los componentes y cómo están correlacionados; y exhaustivo, dado que busca la comprensión del sistema y las oportunidades de mejora.

Dada la íntima relación entre cada uno de los componentes del sistema, las alteraciones deben verse bajo la óptica de cada uno de los componentes, es decir, más allá de lo simple que puede ser el diseño de un sistema de aspiración, una de las dificultades de mayor peso es el efecto que puede tener el cambio que sobre el desempeño del sistema tiene el ajuste en las condiciones de operación [7].

En tal sentido los elementos fundamentales que se deben tomar en consideración para el diagnóstico de un sistema de aspiración localizada se muestran en la Figura 1.

2.1.1. Etapa 1. Descripción esquemática del sistema

Para iniciar el estudio del sistema, se recomienda empezar con un esquema general. El objetivo de esta etapa es identificar todos los puntos de captación, líneas, ductos, filtros y ventiladores presentes. Asimismo, se recomienda incluir los aspectos más básicos del proceso productivo, las zonas de acumulación de polvo, las variables fundamentales (caudal, velocidad de aspiración) y variables del proceso conocidas (temperatura, humedad), entre otros aspectos.

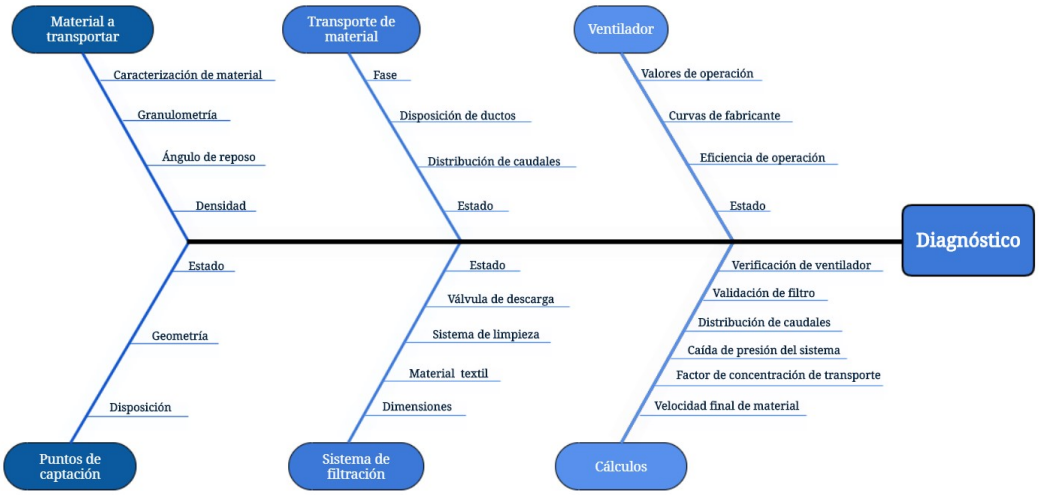


Figura 1: Esquema de diagnóstico

2.1.2. *Etapa 2. Caracterización de material y sistema*

Características del material particulado

El estudio detallado del material de transporte involucra parámetros clásicos como la densidad, y atributos como: pH, tamaño de grano, ángulo de reposo, abrasión, higroscopicidad, humedad, compactación, explosividad.

Características de los puntos de captación

Cada proceso productivo en que exista la necesidad de manejar material particulado posee diferentes focos de dispersión a los cuales debe corresponder un punto de captación. Es necesario atender a la geometría de las campanas, número y disposición. Cualquier aspecto que pueda afectar la aspiración requiere ser identificado, igualmente, todos los datos necesarios para el cálculo de la caída de presión asociada a la campana.

Características del sistema de ductos

Deben detallarse todas las líneas, accesorios, tramos y diámetros del sistema, considerando también el material de los ductos y si existen zonas recurrentes de taponamiento. Deben incluirse accesorios como: entradas de aire falso (bleed –ins), compuertas de limpieza, dámpers, entre otros, todo lo cual estará relacionado con el cálculo de las caídas de presión.

Características del separador de filtros de tejido

Para estos separadores debe contarse con la siguiente información: dimensiones de la estructura externa del filtro; la cantidad, disposición y tamaño de los tejidos (mangas); la longitud y diámetro de los soportes (jaulas); el material del textil; y el sistema de limpieza. Este último es una variable fundamental en el desempeño del filtro, el tipo, la frecuencia y el estado del sistema, el cual se examina junto con la instrumentación del filtro. Generalmente, estos dispositivos cuentan con un manómetro de presión diferencial. Sobre este instrumento, debe verificarse su fecha de calibración, conexiones y funcionamiento. A excepción de condiciones especiales (toxicidad del material, inflamabilidad, temperaturas extremas de proceso, entre otros), los filtros presentan la posibilidad de ser fácilmente inspeccionados internamente. Esta es una actividad relevante siempre que sea posible, prestando atención al estado de compresión de las jaulas y la capa de polvo sobre las mangas.

Adicionalmente, los filtros cuentan con un mecanismo que permite la deposición del polvo y su descarga (llamadas válvulas de descarga) en un silo de almacenamiento o hacia una línea de recirculación al proceso productivo. Algunas válvulas de descarga comunes son: tornillos sinfín, esclusas de aire (airlock valve), "válvulas de doble descarga" o una combinación de dispositivos. El

parámetro a considerar es la efectividad en el control de la salida del material, esto se refleja en la deposición del polvo durante el ciclo de apertura/cierre de la válvula, la recurrencia de atascos y la existencia de alguna condición en la que el sistema de descarga esté inhabilitado.

Ventilador

Conforme al ventilador deben conocerse los datos de placa del motor, principalmente la velocidad de giro (rpm) y potencia, el diámetro del rotor, la orientación de los álabes y caudal de operación; estos datos suelen estar presentes en la hoja técnica del equipo. Otra información relevante son las curvas del ventilador dadas por el fabricante, este elemento es de gran importancia para la evaluación de eficiencia y selección posterior de parámetros. En este punto, es oportuno inspeccionar el área de salida de aire limpio del ventilador en busca de material.

2.1.3. Etapa 3. Cálculos de diagnóstico

Una vez recabada toda la información, se realizan los siguientes cálculos:

Cálculo de la Velocidad Final

La velocidad final puede ser entendida como: "la velocidad mínima para que el material particulado pueda ser suspendido en el aire" [8]. Para su cálculo se utilizan los parámetros adimensionales "Número de Reynolds para material particulado" (Re_{ds}) y "Coeficiente de arrastre" (Cd).

Utilizando la ecuación (1) [8], se ingresa en la Figura 2 para obtener el Re_{ds}.

$$C_d \cdot {Re_{ds}}^2 = \frac{4gd_s(\gamma_s - \gamma_a)}{3{\nu_a}^2\gamma_a} \tag{1}$$

Donde:
Vf : velocidad final [m/s]
g : aceleración de gravedad [9,81 m/s^2]
ds: diámetro de partícula [m]
γ_s: peso específico del material particulado [kgf/m^3]
γ_a: peso específico del aire [kgf/m^3]
Cd : coeficiente de arrastre [adimensional].

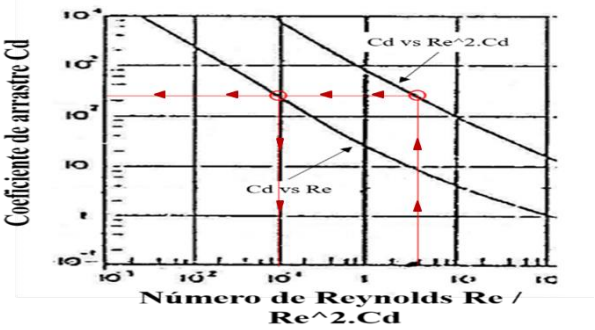


Figura 2: Gráfico Cd vs $Re_{ds}/{Re_{ds}}^2 Cd$ [6]

En función del orden de magnitud del Re_{ds} se emplea la ecuación (2) o (3) según corresponda [8].

El coeficiente de arrastre (Cd), se determina de acuerdo al número de Reynolds para el material particulado (Re_{ds}). Para $10^{-3} < Re_{ds} < 1,0$:

$$C_d = \frac{24}{Re_{ds}} \tag{2}$$

Donde:
Cd : coeficiente de arrastre [adimensional]
Re_{ds} : número de Reynolds para el material particulado

Para $2,0 < Re_{ds} < 5 \times 10^2$:

$$C_d = \frac{18,5}{(Re_{ds})^{3/5}} \tag{3}$$

Finalmente, se obtiene la velocidad final por medio de la ecuación (4) [8]:

$$V_f = \sqrt{\frac{4gd_s(\gamma_s - \gamma_a)}{3C_d\gamma_a}} \tag{4}$$

Cálculo del factor de concentración de transporte

El factor de concentración es una variable que permite clasificar los sistemas de transporte neumático.

Este parámetro es usualmente ignorado en los sistemas de extracción debido a que el flujo másico de producto será mucho menor al flujo másico de aire. No obstante, ante condiciones de atascos o taponamientos, comparar la cantidad de producto aspirado por unidad de tiempo y la del aire es oportuno. Asimismo, este factor puede

utilizarse como indicador de posibles mejoras para el sistema, por ejemplo, en función de la fase y las características del material es posible realizar consideraciones significativas en cuanto a si el sistema necesita ser de presión negativa, alta presión, mixto, o circuito cerrado.

Para el cálculo del factor de concentración debe conocerse cuánto producto se está dispersando en el aire (mermas de proceso), luego dicho valor se descompone en cuánto se está acumulando en el área de trabajo y cuánto se está aspirando.

El factor de concentración se presenta en la ecuación (5) [8]:

$$\mu = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} = \frac{\dot{G}_s}{\dot{G}_a} \tag{5}$$

Donde:
μ factor de concentración [adimensional]
$\dot{m}_s$: flujo másico del sólido transportado [kg/s]
$\dot{m}_a$: flujo másico del aire [kg/s]
$\dot{G}_s$: peso del sólido transportado por unidad de tiempo [kgf/s]
$\dot{G}_a$: peso del aire por unidad de tiempo [kgf/s]

De acuerdo a este criterio existen lo siguientes sistemas de transporte neumático:

- Sistemas de baja concentración: $\mu < 15$.
- Sistemas de alta concentración: $\mu > 15$.

Cálculo de caída de presión

La caída de presión debe ser determinada mediante un estudio en campo utilizando las herramientas adecuadas. La instrumentación del estudio dependerá del proceso, material y puntos de inspección, para esta aplicación comúnmente se emplean tubos de Pitot o anemómetros. Se recomienda la utilización de anemómetros térmicos considerando los numerosos equipos cuyas lecturas pueden verse afectadas por el polvo transportado.

A pesar que algunos instrumentos poseen filtros, estos también afectan la precisión del instrumento y generan dispersión en los resultados. Las mediciones deben realizarse en cada ramal y línea del sistema de aspiración, de esta forma es posible detectar desbalances en la aspiración y fugas de caudal. Una vez determinada la caída de presión y el flujo volumétrico del sistema, se visualizan dichos valores en las curvas del ventilador para validar la operación y eficiencia del mismo. En el caso de no poder realizar dicho estudio en campo, en función de los datos recopilados, puede realizarse una aproximación teórica a las pérdidas del sistema. Bajo estas circunstancias se recomienda:

1. Definir una ruta de cálculo.
   Fungiendo como guía de cálculo, establece el punto de partida. En sistemas complejos, con numerosos puntos de captación, ramales y líneas, el decidir dónde empezar e integrar cada punto con el ramal, el ramal con la línea y las líneas entre sí, puede ser confuso. El desglose esquemático planteado pretende descomponer el sistema en un estudio paso a paso, tramo a tramo. Cada sección y elemento debe ser debidamente identificado.
2. Selección de método de cálculo.
   Conociendo el material de los ductos y sus accesorios, es posible hallar ecuaciones, tablas o gráficas que permitan calcular la caída de presión asociada al elemento en función del diámetro y caudal, principalmente.
   Dependiendo del componente, será necesario conocer otros parámetros como la longitud (ductos), radios (codos) o ángulo (ampliaciones). Para ductos circulares, de chapa metálica galvanizada, nuevos, el Manual de Ventilación Industrial [7] establece la ecuación (6) para las pérdidas de carga en términos de presión dinámica por metro.

$$\frac{\Delta p}{\gamma \cdot m_{fl}} = \frac{27,8}{Q^{0,079} D^{1,066}} \tag{6}$$

Donde:
$\frac{\Delta p}{\gamma \cdot m}$: factor de pérdida por metro de conducto [mm c.a/m]
Q : flujo volumétrico [m^3/s]
D : diámetro de ducto [mm]

Para los accesorios se utiliza la ecuación (7), Mills [8] presenta una serie de gráficos (Figuras 3 y 4) de donde se extrae un factor "k" que se multiplica por la presión dinámica para obtener las

pérdidas.

$$\frac{\Delta p}{\gamma}_{acc} = k \cdot p_d \tag{7}$$

Donde

$\frac{\Delta p}{\gamma}$: pérdidas en accesorio [mm c.a]

k: factor de accesorio [adimensional]

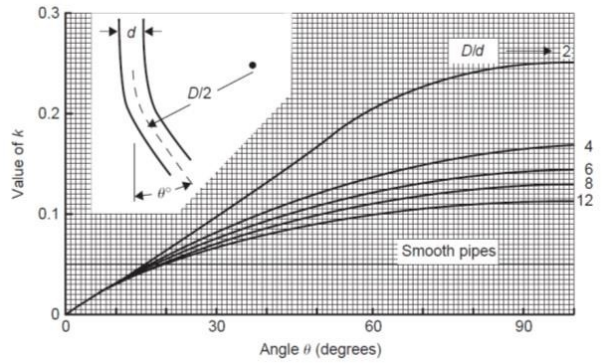


Figura 3: Gráfico de factor k para codos [8]

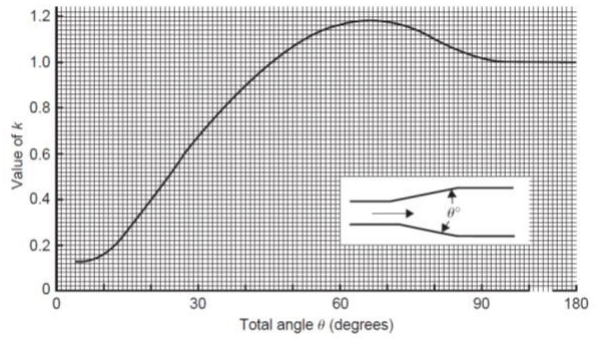


Figura 4: Gráfico de factor k para expansiones [8]

Con la definición de presión dinámica para el aire standard del Manual de Ventilación Industrial [7], ecuación (8):

$$p_d = \left(\frac{V}{4,043}\right)^2 \tag{8}$$

Considerando la ecuación de caudal para conductos circulares, ecuación (9):

$$Q = \frac{\pi V D^2}{4} \tag{9}$$

Tomando la ecuación anterior y colocándola en función del flujo volumétrico, ecuación (10):

$$p_d = \left(\frac{Q}{1,01\pi\,(1000D)^2}\right)^2 \tag{10}$$

Donde:

p_d: presión dinámica [mm c.a]

Q: flujo volumétrico [m^3/s] D: diámetro de ducto [mm]

Sustituyendo la ecuación (10) en la ecuación (7) se obtiene la ecuación (11):

$$\frac{\Delta p}{\gamma}_{acc} = k \cdot \left(\frac{Q}{1,01\pi D^2}\right)^2 \tag{11}$$

Donde:

$\frac{\Delta p}{\gamma}$: pérdidas en accesorio [mm c.a]

k: factor de accesorio [adimensional]

Q: flujo volumétrico [m^3/s]

D: diámetro de ducto [mm]

En el caso de las pérdidas de carga debido al filtro de mangas, dicha caída de presión se puede tomar como constante y asignarle el valor tomado del manómetro de presión diferencial, una vez verificado el correcto funcionamiento de este instrumento.

3. Tabular los tramos para obtener las curvas de pérdidas de tramo
   Considerando que no se tiene el valor del flujo volumétrico, se seleccionará un rango, se tabularán los valores de caudal y los valores de caída de presión del tramo en función de dicho rango.
   Partiendo de las tablas a realizar, es posible obtener las curvas de pérdidas aproximadas.
4. Obtener el punto de operación del sistema. Una vez culminada la ruta de cálculo, el resultado se plasma en la curva de pérdidas del sistema. Esta curva se intercepta con la curva del ventilador para hallar el punto de operación del sistema.

Determinación de la distribución de caudales

Un aspecto fundamental es que el sistema debe estar balanceado para ofrecer una aspiración uniforme, en las situaciones en las que no lo esté, dicho desbalance debe ser deliberado para suplir algún requerimiento específico.

La distribución de caudales puede obtenerse indirectamente del estudio de pérdidas en campo.

Si este no pudo realizarse, puede tomarse el punto de operación teórico y el "plan de trabajo". Operando en sentido inverso, es posible obtener los valores de flujo volumétrico para cada tramo al ya tener las curvas de pérdidas de cada uno. En cualquiera de los casos, es oportuno ilustrar la distribución de caudales y hacer comparaciones porcentuales; estas herramientas permiten enfocar el rediseño de los tramos a las áreas más necesitadas.

Validación de filtro

Los separadores por filtro de tejido poseen una variable característica denominada "velocidad de filtración". Echeverri-Londoño [9], establece que "una filtración eficiente requiere que la velocidad de filtración esté en el intervalo de 0,005 a 0,050 m/s", para ello en la Tabla 1 se muestran de valores recomendados en función del material particulado y material textil.

Tabla 1: Velocidades de filtración recomendadas [9]

Partículas	V_{fil} (m/s)	
	Agitación / Contracorriente (tela tejida)	Aire a presión (fieltro)
Alimento de ganado	0,018	0,071
Almidón	0,015	0,041
Alúmina	0,013	-
Cal	0,013	0,051

Si bien el filtro ya se encuentra instalado, tomando la velocidad de filtración y el caudal conocido, es posible calcular el "área de filtración", ecuación (12) [9]:

$$A_{fil} = \frac{Q}{V_{fil}} \tag{12}$$

Donde:
A_{fil}: área de filtración [m^2]
Q: flujo volumétrico [m^3/s]
V_{fil}: velocidad de filtración [m/s]

Obtenida el área total de filtración y conociendo las dimensiones de los textiles instalados, se procede a calcular la superficie individual de cada uno, ecuación (13) [9]:

$$A_u = \pi DL + \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \tag{13}$$

Donde
Au: área de separador [m^2]
D: diámetro de separador [m]
L: longitud de separador [m]

Finalmente, el número de separadores se calcula dividiendo el área de filtración entre el área de separador, ecuación (14) [9]:

$$N°_{sep} = \frac{A_{fil}}{A_u} \tag{14}$$

Donde
$N°_{sep}$: número de separadores [adimensional]
A_u: área de separador [m^2]
A_{fil}: área de filtración [m^2]

Los separadores de polvo (mangas) se ordenan en arreglos matriciales, generalmente cuadrados. De verificar que el filtro es adecuado para el sistema actual, es una buena práctica el determinar con la metodología anterior un rango de caudales que permitan mantener el dispositivo.

Validación de ventilador

El punto de operación del sistema permite conocer la eficiencia del ventilador y conocer si la turbomáquina actual es la más apropiada para el sistema. Si se están operando en intervalos de baja eficiencia, pueden considerarse modificaciones del equipo o el reemplazo del mismo.

Previo a sopesar el reemplazo por una máquina más grande o más pequeña, un simple cálculo puede dilucidar si se está empleando el tipo de ventilador adecuado. Por defecto, para la aspiración suelen utilizarse ventiladores centrífugos, sin embargo, ante altos requerimientos de caudal pueden seleccionarse ventiladores axiales. Mediante una serie de cálculos simples, por medio de factores adimensionales, es posible determinar utilizando el diagrama de Cordier qué tipo de máquina es la más apta.

Convirtiendo la caída de presión de milímetros de columna de agua a disponibilidad para ser expresada en metros, ecuación (15):

$$h = \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} \frac{\Delta p}{\gamma} = 830,941 \frac{\Delta p}{\gamma} \qquad (15)$$

Donde
$\frac{\Delta p}{\gamma}$: caída de presión [mm c.a]
h: disponibilidad [m]

Con la disponibilidad se calcula la velocidad específica para entrar en el diagrama de Cordier (Figura 5), ecuación (16) [10]:

$$N_s = \frac{NQ^{1/2}}{(gh)^{3/4}} \qquad (16)$$

Donde
N_s: velocidad específica [adimensional].
N: velocidad de rotación [rad/s].
Q: caudal [m^3/s].
g: aceleración de gravedad [9,81 m/s^2].
h: disponibilidad [m]

Por medio de la ecuación (17) [10] que establece la relación entre el diámetro específico y el diámetro real, es posible verificar si las dimensiones del filtro son apropiadas para los requerimientos del sistema.

$$D_s = \frac{D(gh)^{1/4}}{Q^{1/2}} \qquad (17)$$

Donde
D_s: diámetro específico [adimensional].
g: aceleración de gravedad [m/s^2].
h: disponibilidad [m].
D: diámetro del rotor [m].

Para calcular el diámetro teórico del rotor, se despeja de la ecuación (17) y se obtiene, ecuación (18) [10]:

$$D = \frac{(gh)^{1/4}}{D_s Q^{1/2}} \qquad (18)$$

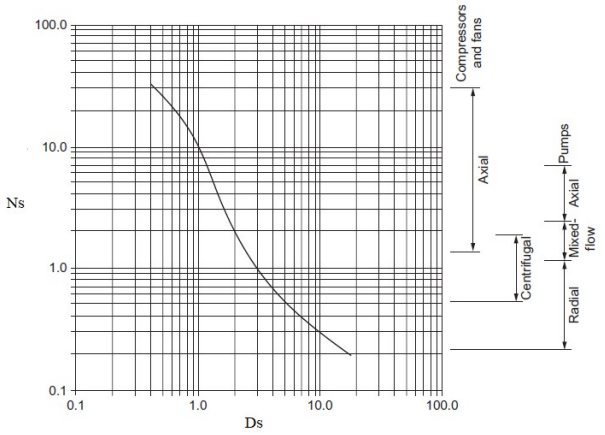


Figura 5: Diagrama de Cordier [10]

2.2. *Fase II. Diseño*

Esta fase considera individualmente cada componente que se ha determinado necesario rediseñar. En aras de simplificar el proceso, la interacción del componente con el sistema más allá de su función es considerado en la fase posterior.

2.2.1. *Diseño de elementos de captación*

La forma, disposición y número de puntos de captación son variables condicionadas por el proceso al que pertenezca el sistema de extracción. En algunos casos, la aspiración se realiza sobre una máquina la cual presenta (por diseño de fábrica) puntos de aspiración propios. En otros casos, la aspiración es considerada separada de la operación en cuestión. La recomendación general para cualquier circunstancia consiste en contener el material particulado en un espacio cerrado y colocar los puntos de captación tan cerca del foco de difusión de polvo como sea posible. La geometría de la campana se diseña en función de las velocidades requeridas a desarrollarse en ella.

Es necesario seleccionar un valor de velocidad de captación teniendo en cuenta las velocidades de aspiración recomendadas y la velocidad de transporte del material. La posición del punto de captación debe considerarse para asegurar que la velocidad de aspiración en el foco de dispersión (velocidad de captación) supere o iguale la velocidad final del material, recordando que la velocidad disminuye en función de la distancia (Figura 6). El número de campanas se determina en

función del caudal y la caída de presión asociada, si bien a mayor número, menor caída de presión, el costo de la inversión adicional puede ser demasiado grande en comparación a los beneficios de dicha solución.

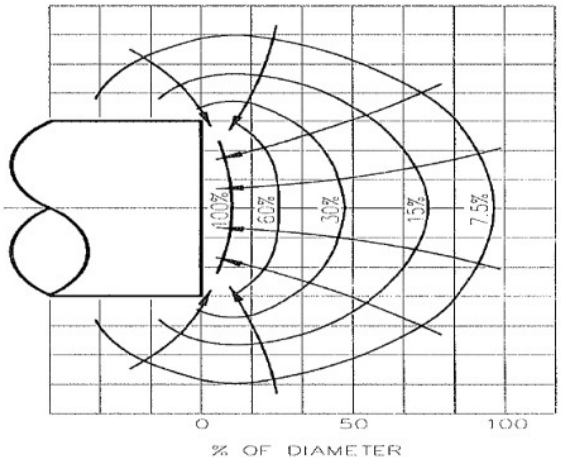


Figura 6: Disminución porcentual de la velocidad en función de la distancia medida en porcentajes de diámetro [7]

De considerarse que los elementos de captación actuales son alternativas viables para el sistema, los mismos pueden ser estudiados en función de los parámetros desarrollados a continuación. Si bien el planteamiento se enfoca en el diseño, es útil igualmente para evaluación y comparación con otras propuestas de solución. El esquema de diseño para la campana se muestra en la Figura 7.

Definición de premisa de diseño

La premisa de diseño es un concepto que engloba las consideraciones preliminares, requerimientos básicos y necesidades fundamentales que debe cumplir la campana. Debe ser una definición densa para ser un punto de partida sólido para los prototipos, a su vez, es menester que sea lo suficientemente simple para guiar el proceso de pensamiento creativo sin limitarlo.

Identificación de las limitantes

Se realiza un listado de las limitaciones existentes como aspectos que el prototipo debe sobrellevar desde el momento de su concepción. Estos no son elementos de descarte, por el

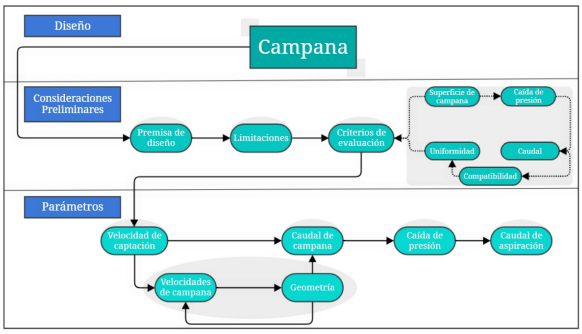


Figura 7: Esquema de diseño de campana

contrario, son esquemas a los que la campana debe adaptarse.

Establecimiento de criterios de evaluación

Los "criterios de evaluación" son los parámetros de desempeño teórico de cada alternativa de solución. Tomando dichos conceptos como punto de partida, el objetivo es analizar exhaustivamente el prototipo en cuestión. Esta metodología plantea los siguientes criterios:

- Superficie total de campana
  Este criterio procura estimar el costo económico del dispositivo. De acuerdo a este concepto, aquella opción que comprenda la mayor superficie tendrá un mayor costo.
- Caída de presión de la campana
  Este criterio requiere cuantificar la pérdida de carga, este es un factor de relevante al comparar la eficiencia entre prototipos. Al considerar velocidades de captación similares, aquél que desarrolle la menor caída de presión, tendría mejor valoración conforme a este criterio. Si bien todo sistema de presión negativa requiere un mínimo de caída de presión para operar de forma óptima, en esta etapa solo se tomará en cuanta el diseño con menor valor en aras de un sistema más pequeño.
- Caudal derivado total
  De acuerdo al tipo y geometría de la campana es posible establecer una ecuación que permita conocer el caudal que determinada velocidad de captación produciría (ver Manual de Ventilación Industrial [7], capítulo 3). Este caudal, multiplicado por la cantidad de

dispositivos y la cantidad de máquinas, establecerá el caudal del sistema; variable fundamental en la selección del ventilador y dimensionamiento de los ductos.

- Compatibilidad del caudal con el sistema
  En función de las conclusiones de la etapa de diagnóstico y las dimensiones preliminares del proceso, es oportuno considerar si el caudal derivado del dispositivo es congruente en magnitudes con las dimensiones del sistema. Es importante tomar en cuenta este criterio tras decisiones como utilizar el filtro o ventilador instalado.
- Uniformidad de aspiración
  La aspiración no-uniforme conlleva a acumulaciones de material particulado en determinadas áreas. Siempre que sea relevante, la dispersión de los valores de aspiración debe ser tan pequeña como sea posible.

2.2.2. Diseño de sistema de ductos

Así como la función de las campanas es captar el material, el propósito del sistema de ductos es el transporte del mismo. De esta manera, el diseño se basa en la conexión de los puntos de captación con el elemento de filtración. Esta etapa inicia con la progresiva incorporación de las campanas desde las áreas de dispersión de polvo, dicha unión formará una ramificación del sistema, seguidamente las ramificaciones se vincularán conformando las líneas. En este punto debe tomarse la decisión: si se desea utilizar una línea central que conecte con el filtro; varias líneas que se junten a la entrada de este componente; o utilizar múltiples colectores de polvo. En términos de procedimientos de cálculo, el diseño de ductos se basa en el ajuste de los valores de caudal, velocidad de transporte y área de sección transversal. El área varía para mantener la velocidad de transporte ante incrementos de caudal controlando las pérdidas por fricción, en la mayoría de los casos.

2.2.3. Diseño de separador de tejido

El procedimiento de diseño del filtro sigue el procedimiento descrito en la sección 2.1.3 (validación de filtro) a través de las ecuaciones (12), (13), (14), empezando con la selección de la velocidad de filtración. Con el caudal utilizado en los apartados en anteriores y la velocidad de filtración, se calcula el área de filtración (ecuación (12)). Con dicho valor, se realizan iteraciones de la ecuación (14) con tamaños comerciales de separadores (mangas) hasta hallar la configuración que cumpla con la disponibilidad de espacio y requerimientos del proceso; este número debe ser entero y corresponder a una matriz cuadrada o rectangular. Con esta matriz, puede establecerse el rango de caudales adecuado para el filtro, es decir, si se tiene un arreglo de 100 mangas, el rango de caudales es aquel que requiera de entre 91 (mayor a 9×10) y 109 mangas (menor a 9×11). Una vez dimensionada la matriz de separadores, continua con el diseño de la tolva de descarga, para lo cual se recomienda tomar en cuenta el ángulo de reposo del material. Finalmente se selecciona la válvula de descarga y el sistema de limpieza.

En este momento es oportuno estimar la caída de presión debido al filtro, Echeverri–Londoño [9] comenta: "puede esperarse una caída de presión máxima de 127 a 254 mm", por lo que se recomienda seleccionar un valor entre dicho rango. Si se desea un valor más exacto puede considerarse la metodología implementada por Peralta [11], recordando que la caída de presión debido al filtro varía en función de la suciedad de este y se incrementa con el tiempo.

2.2.4. Selección de ventilador

A excepción de aplicaciones especiales, los ventiladores generalmente son diseñados en función de guías, herramientas y catálogos de fabricante. Para ello es necesario contar con el punto de operación del sistema, el cual se recomienda se sitúe a la derecha del punto nominal del ventilador, de manera que la eficiencia incremente con la adición de pérdidas; antes de disminuir. Se tiene la posibilidad de seleccionar el ventilador dimensionándolo por medio de las ecuaciones (16), (18) y el Diagrama de Cordier (Figura 5).

3. Presentación de resultados

En función a la propuesta mostrada en la metodología se procedió a hacer la implementación

en el contexto de una industria de detergente en polvo, obteniéndose los siguientes resultados.

3.1. Fase I

3.1.1. Caracterización del material

El detergente presente en el proceso estudiado es un producto alcalino e higroscópico, cuya granulometría depende del control de las variables presión de entrada y temperatura del aire a contra corriente de la "Torre de secado". En ese sentido, en la Tabla 2 se muestran las características físico químicas estándar del detergente de estudio.

Tabla 2: Características físico-químicas estándar del detergente de estudio

Propiedad	Rango
Densidad [kg/m^3]	[400;600]
pH	[9;11]

Para el analizar el proceso de captación debe definirse una densidad y diámetro de partícula que permitan extraer el material particulado disperso en el aire sin perjudicar el proceso de llenado y empacado del producto.

De acuerdo con Salager [12] el polvo de detergente no debe contener "polvillo". El polvillo se genera debido a la fractura del grano de detergente durante el proceso de secado en consecuencia de condiciones inadecuadas de presión y temperatura. Así mismo, puede dársele el tratamiento de "partícula suspendida" de acuerdo al decreto presidencial 638 (1995) "Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica", en este decreto también se establecen las concentraciones permisibles para el aire limpio en el caso de presencia de partículas suspendidas. Reflejándose en la Tabla 3 las características de dicho material.

Tabla 3: Características físico-químicas estándar del material particulado de estudio

Propiedad	Valores
Densidad [kg/m^3]	400
Tamaño de grano [μm]	60
Ángulo de reposo (°)	35

A fines de este estudio, se consideró polvo fino de detergente a todo material particulado derivado con una densidad de 400 kg/m^3 y un tamaño de grano de 60 μm

3.1.2. Caracterización de los puntos de captación

En el caso de estudio la zona de mayor acumulación de polvo es la que corresponde a las llenadoras gravimétricas, este material particulado cae directamente sobre componentes de las empacadoras no diseñados para recibirlo. Las llenadoras poseen la siguiente disposición de aspiración: una campana de aspiración sobre la tolva principal, luego dos líneas laterales de sección cuadrada (80×80 mm) de donde se originan conexiones a pequeñas campanas dispuestas sobre las cubetas más inferiores. Los puntos de captación están ubicados de forma lateral.

La Figura 8 permite visualizar la configuración interna, se detalla el reducido espacio libre interno y los componentes de las máquinas.

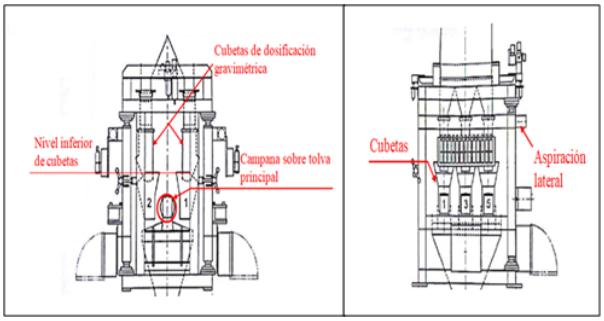


Figura 8: Descripción de llenadoras gravimétricas

3.1.3. Caracterización del sistema de ductos

El sistema de ductos constituye una ampliación progresiva de diámetro desde 75 mm hasta 450 mm (3 in – 18 in), los ductos son de acero galvanizado de 1,5 mm de espesor. Cada ramal correspondiente a las líneas de producción posee una trifurcación cuyas salidas se conectan a la llenadora y a la empacadora respectiva. Los ductos poseen puntos de muestreo para mediciones de velocidad y caída de presión. Así la Figura 9 muestra una distribución del sistema de ductos.

3.1.4. Caracterización del separador de filtros

El filtro del área de empacado es un filtro de mangas de limpieza exterior, contiene 100 mangas de polipropileno distribuidas en un

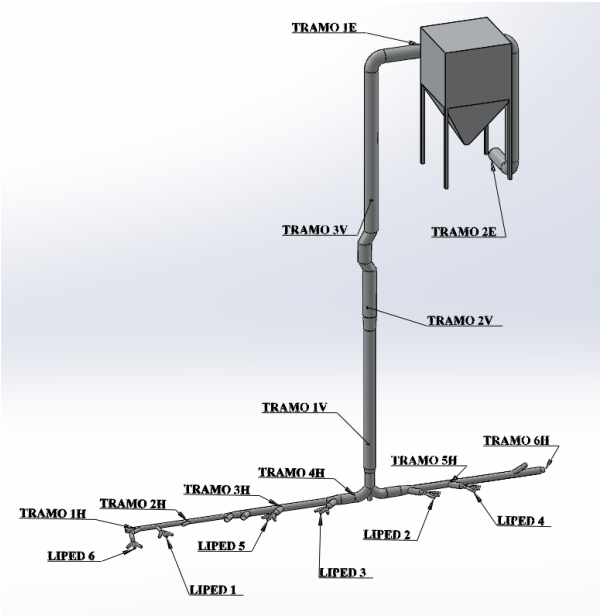


Figura 9: Sistema de ductos instalado

arreglo de 10×10 (filas por columnas), dado su considerable tamaño este se ubica en una terraza, las dimensiones del cuerpo del filtro se estiman en $2{,}34 \times 2{,}34 \times 5$ m posee un sistema de limpieza tipo pulse-jet y una presión de limpieza de 413,68 kPa (60 psi). La Tabla 4 resume las características de las mangas del filtro junto con sus dimensiones del cuerpo del filtro.

Tabla 4: Características del filtro de mangas

Arreglo de mangas	10×10
Diámetro y longitud de mangas	139,7 mm x 2,43 m (5,5 in x 8 ft)
Área filtrante	1,066 m^2
Material de las mangas	Polipropileno
Técnica de limpieza	Pulse-jet
Presión de limpieza	413,68 kPa (60 psi)
Tiempo entre disparos	6 s
Dimensiones del cuerpo del filtro	$2{,}58 \times 2{,}58 \times 5$ m

3.1.5. Características del ventilador

El ventilador instalado es un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás fabricado por la empresa nacional CO-IN C.A modelo HTM 4019, de diámetro de impulsor 900 mm. La placa del motor acoplado al ventilador establece una potencia de 34,5 kW (46 hp).

3.1.6. Cálculo de la Velocidad Final

Se determina la velocidad final del detergente estándar conforme a no excederla con los parámetros de operación a definir (caudal y caída de presión), los parámetros para el polvillo se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Cálculo de velocidad final del polvillo (material particulado)

Coeficiente de arrastre por el cuadrado del Reynolds para el diámetro esférico ($C_d {Re_{ds}}^2$)	$4{,}085 \approx 4$
Número de Reynolds para el diámetro esférico de partícula (Re_{ds})	0,1
Coeficiente de arrastre (C_d)	240
Velocidad final del polvillo(V_f) [m/s]	0,03

El polvillo de detergente posee una velocidad mínima baja, este aspecto es un indicio conforme al dimensionamiento del sistema y velocidades de transporte. La Tabla 6 muestra los parámetros para el cálculo de la velocidad final del detergente

Tabla 6: Cálculo de la velocidad final para el detergente estándar

Coeficiente de arrastre por el cuadrado del Reynolds para el diámetro esférico ($C_d {Re_{ds}}^2$)	3194 $\approx$
Número de Reynolds para el diámetro esférico de partícula (Re_{ds})	20
Coeficiente de arrastre (C_d)	3,1
Velocidad final del polvillo(V_f) [m/s]	0,98

De acuerdo con la norma COVENIN 2250:2000 [13] que establece un rango recomendado de velocidades de aspiración, el detergente requiere del límite superior del rango de velocidades recomendadas para ser transportado. Teniendo en cuenta el diferencial entre ambas velocidades, se infiere que es posible aspirar polvillo sin comprometer el sistema gravimétrico de llenado.

3.1.7. Estimación de las pérdidas

En función de la metodología mostrada se evalúan las pérdidas en cada tramo. En la Tabla 7 se muestran las pérdidas totales según el sistema en estudio.

En la Figura 10 se visualiza la curva general de pérdidas del sistema instalado y su ecuación aproximada.

Tabla 7: Pérdidas totales del sistema instalado

Caudal, Q [m^3/s]	Pérdida, hf [mm.c.a]
0,01	0,003
0,05	0,082
0,10	0,323
0,50	7,901
1,00	31,301
1,50	70,041
2,00	124,036

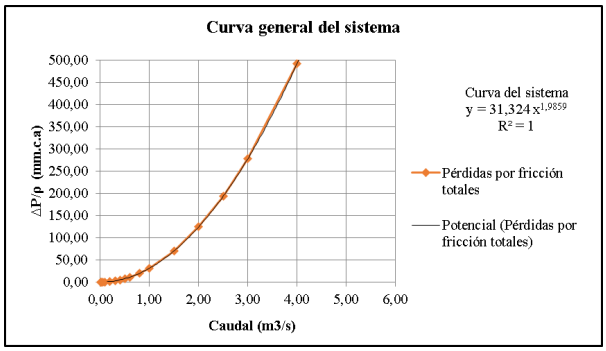


Figura 10: Curva de pérdidas del sistema

3.1.8. Distribución de caudales

Evaluando las curvas características del ventilador, seleccionando puntos de interés y graficando estos, se obtiene la curva del ventilador la cual se intercepta con la curva general del sistema para obtener el punto de trabajo. La curva general del sistema presenta una adición de 127 mm.c.a. (5 in c.a), con esto se busca tomar en consideración las pérdidas derivadas del filtro de mangas estableciendo un valor común según Echeverri–Londoño [9]. La intersección de las curvas establece que el caudal de trabajo es de 2,512 m^3/s (150,72 m^3/min), la disponibilidad 322,72 mm.c.a y la eficiencia de operación del ventilador es del 82,9 %.

Una vez hallado el punto de trabajo del sistema se realiza el estudio del caudal que pasa a través de cada tramo, evaluando la fracción en cada entrada, especialmente aquellas cuya función no está determinada. El estudio de caudales, al igual que el de pérdidas, se establece hasta las salidas sin conexión y trifurcaciones como se observa en la Figura 12.

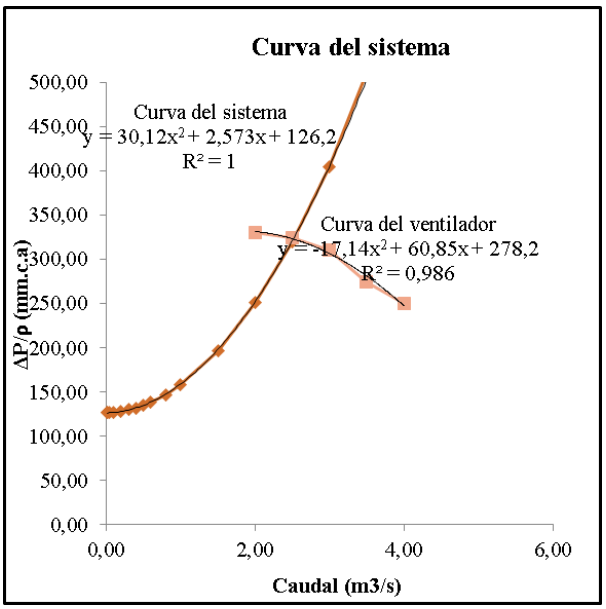


Figura 11: Curva general del sistema considerando las pérdidas del filtro y curva del ventilador

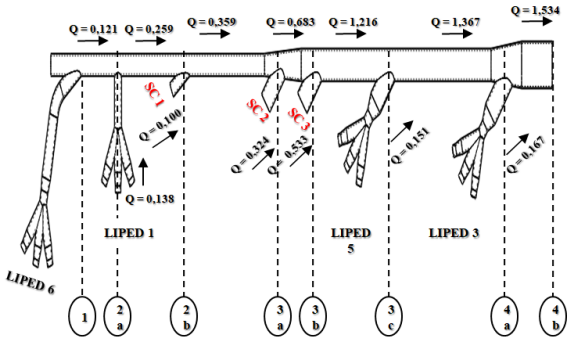


Figura 12: Distribución de caudales tramo 1-4

3.1.9. Validación de los filtros

Se determina un rango tanto de presión como de caudal que estén dentro de los valores manejados por estos dispositivos, en la Tabla 8 se muestran los valores de flujo volumétrico para que el filtro se mantenga dentro del arreglo de 100 mangas con las dimensiones de 5,5 in (0,1397 m) de diámetro y 96 in (2,43 m) de altura. La velocidad de filtración seleccionada es de 0,025 m/s ya que esta pertenece al polvo (detergente, jabón) el cual es el contaminante estudiado en este trabajo.

Por lo tanto, se tiene que el rango del caudal para mantener la configuración del filtro de 100 mangas se encuentra entre 2,44 m^3/s - 2,7 m^3/s.

La Tabla 9 muestra los parámetros asociados al

Tabla 8: Estimación de caudales para filtro de mangas actual

Velocidad de filtración recomendada, V [m/s]	0,025
Área de filtración, A [m^2]	98
Área de filtración por cada manga, A_b [m^2]	1,0818
Número total de mangas, N	$90,21 \cong$ 91 mangas
Área de filtración, A [m^2]	108
Área de filtración por cada manga, A_b [m^2]	1,0818
Número total de mangas	$99,83 \cong$ 100 mangas

cálculo de la caída de presión debida al filtro de mangas.

Tabla 9: Cálculos de pérdidas de presión debido al filtro de mangas

Parámetro	Valor
Relación Dennis - Klemm	1,7614
Coeficiente de resistencia especifico del polvo, K_s [inc aminft/lb]	7
Caída de presión del filtro, Δp [in c.a]	1,7619
Caída de presión del filtro, Δp [mmc.a]	44,7519

El material textil de las mangas del filtro corresponde al "fieltro de polipropileno", el cual es uno de los materiales actualmente disponible en el mercado nacional. En las referencias halladas no se encontraron los datos de este textil en específico, sin embargo, se considera para el cálculo de la caída de presión por medio de la relación Dennis – Klemm [14] que las propiedades del material disponible son semejantes al "Dacrón" en los parámetros correspondientes.

Validación del ventilador

Se establece la selección del tipo de turbomáquina adecuada según las características pertenecientes al dispositivo y dependientes de los parámetros requeridos por el sistema. En la Tabla 10 se muestran las relacione para el dimensionamiento del ventilador

Los resultados de la determinación del diámetro del rotor aproximado indican un valor de 0,8 m, y se tiene que para este valor cumple las condiciones de un ventilador centrífugo.

Tabla 10: Relaciones para el dimensionamiento del ventilador

Parámetro	Valor
Equivalencia de presión a disponibilidad, h [m]	263,62
Velocidad específica, N_s [RPM]	0,8015
Diámetro específico D_s	$\approx$ 3,6
Diámetro aproximado del rotor, D [m]	0,8

A pesar de que estos valores satisfacen la validación del ventilador se probará con un valor de diámetro del rotor de 0,9 m siendo este el diámetro del ventilador actualmente instalado.

Calculando nuevamente el diámetro específico se introduce en el diagrama de Cordier para verificar si este diámetro y los requerimientos del sistema cumplen las condiciones del mismo tipo de turbomáquina.

Tabla 11: Cálculo del diámetro específico con el diámetro del ventilador actual

Diámetro específico, D_s	4,04

Con este nuevo valor de diámetro específico y los datos de operación del sistema se determina en la Figura 13 si cumple con las condiciones de la turbomáquina para su validación.

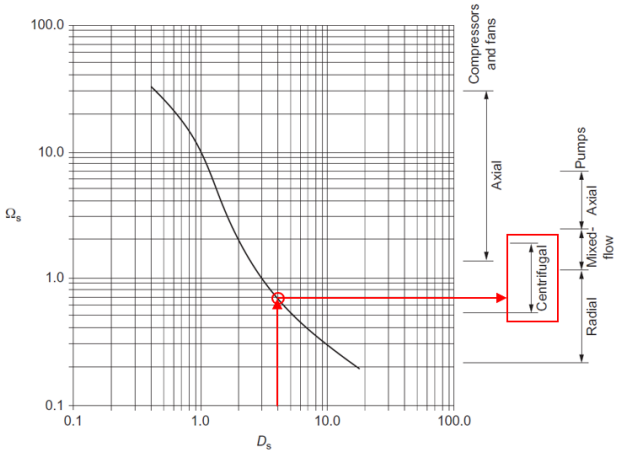


Figura 13: Validación del tipo de turbomáquina con el diámetro del ventilador actual y los requerimientos del sistema (Dixon [10])

El diámetro del ventilador centrífugo actual satisface la validación para el tipo de turbomáquina requerida por el sistema de aspiración.

3.2. Fase II. Diseño

En el caso de estudio particular sobre el cual se efectuó la fase de diagnostico se procedió a realizar el diseño, centrado en dos aspectos fundamentales, el primero es la campana como elemento de captación y el segundo refiere al sistema de ductos.

En cuanto a la campana se configura la extracción mediante semi-cabinas en cubetas, tal como se muestra en la Figura 14.

Esta solución posee un ducto central de 75 mm (3 in) de diámetro, ductos laterales de 25 mm de diámetro y campanas de extracción identificadas como 1, 2 y 3 respectivamente tomando como "1" el par de cubetas más alejadas de la aspiración y "3" el par más cercano (ya que las cubetas en un mismo par son iguales), de 100 mm x 45 mm con una amplitud de 90°. La longitud de las campanas varía en un intervalo constante de 15 mm desde el par 1, cuya longitud es 70 mm, hasta el par 3, cuya longitud es 40 mm; esta disposición asegura una velocidad de captación semejante por cada cubeta.

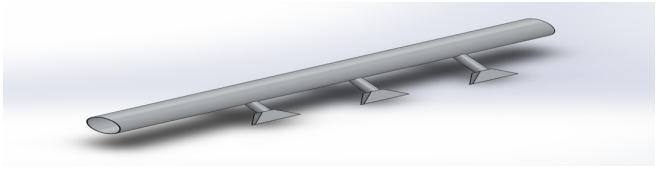


Figura 14: Visualización de extracción mediante semi-cabinas en cubetas

La disposición de esta alternativa de solución instalada en el sistema se visualiza en la Figura 15.

Se procede a realizar el estudio de pérdidas para lo cual se efectúa el cálculo de los caudales, cuyos resultados se observan en la Tabla 12.

En tal sentido, la solución de la simulación numérica computacional de la opción de diseño, se observa en la Figura 16 y muestra las líneas de flujo a través de cada campana en donde la mayor velocidad de aspiración se encuentra en las cubetas 1 y 2. Los resultados de la simulación muestran una caída de presión de 24,342 mm c a, comparando este valor se tiene un error del 32 %.

En cuanto al sistema de ductos la propuesta consta de 2 tramos principales divididos en lados izquierdo y derecho, empezando desde el tramo izquierdo, abarca las llenadoras desde LIPED 6 hasta LIPED 5 aumentando el diámetro del ducto progresivamente con cada línea añadida al mismo. El tramo derecho toma a LIPED 4 y LIPED 2, ambas líneas finalmente convergen en el punto de unión UTP (unión de tramos principales) el cual se ubica en la mezanine de las llenadoras, posteriormente se conectan a la succión del sistema.

Los aumentos de diámetro se realizan con expansiones en los puntos de unión con las líneas

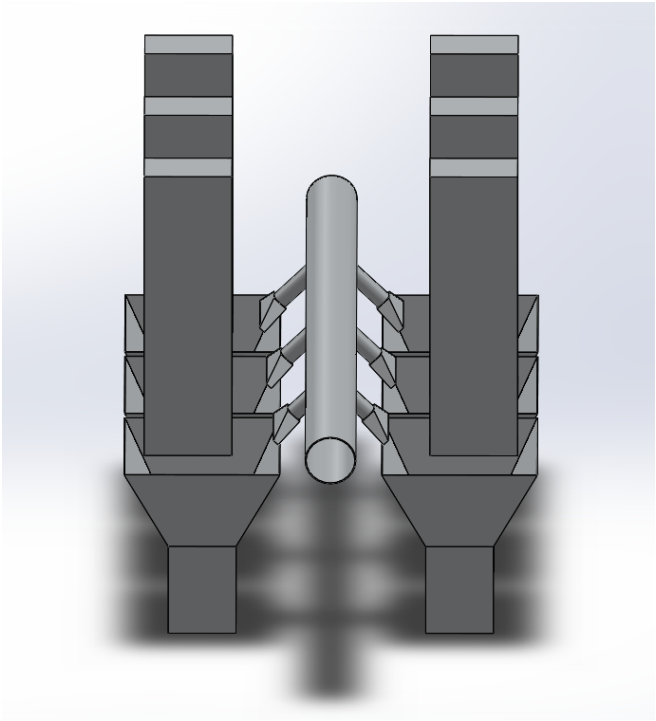


Figura 15: Visualización de la instalación de la extracción mediante semi-cabinas en cubetas

Tabla 12: Caudales y pérdida total

Parámetro	Valor
Caudal en campanas del par 1, Q_1 [m^3/s]	0,0065
Velocidad en campanas del par 1, V_1 [m/s]	0,5892
Caudal en campanas del par 2, Q_2 [m^3/s]	0,0065
Velocidad en campanas del par 2, V_2 [m/s]	0,3919
Caudal en campanas del par 3, Q_3 [m^3/s]	0,0067
Velocidad en campanas del par 3, V_3 [m/s]	0,3034
Pérdidas totales en campana, h_t [mmc a]	16,619

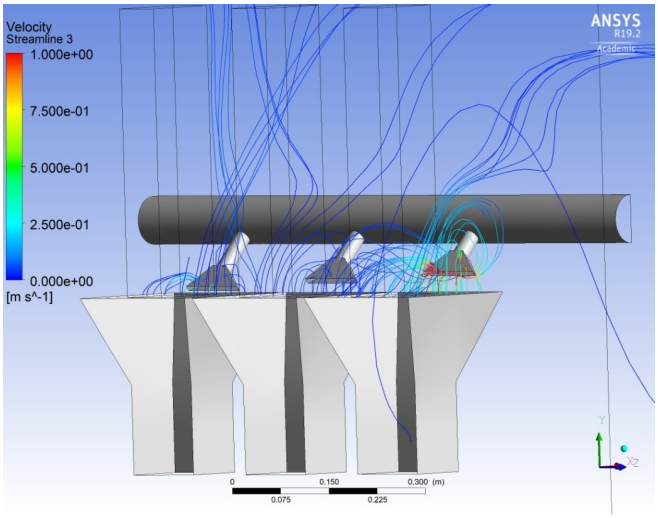


Figura 16: Simulación de la opción de diseño de las campanas

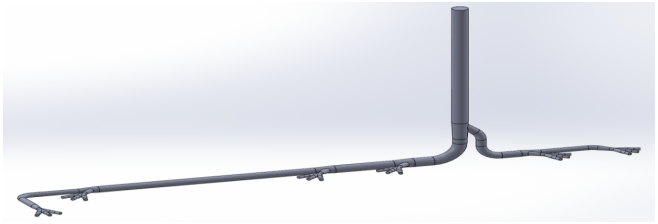


Figura 17: Vista isométrica de alternativa de solución de ductos en línea central

de las llenadoras y los cambios de dirección se efectúan con codos de 90° y 45° con una relación de radio y diámetro de dos ($r/D = 2$). En la Figura 17 se muestra un esquema de la alternativa de solución.

En la Figura 18 se muestra la curva de pérdidas del sistema de ductos

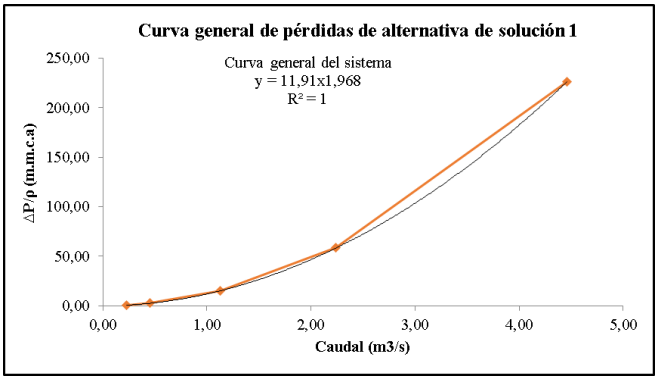


Figura 18: Visualización de alternativa de solución de sistema de ductos 1

La Tabla 13 describe la distribución de caudales y cálculo de la desviación estándar entre líneas.

Tabla 13: Velocidad inducida en las cubetas debido a la primera alternativa de solución

Línea de producción	Caudal [m^3/s]
4	0,446
2	0,469
3	0,512
5	0,478
1	0,401
6	0,391
Promedio	0,45
Desviación estándar	0,046

4. Conclusiones

El abordaje del rediseño de un sistema de extracción localizada pasa necesariamente por un diagnóstico que en principio puede consumir una cantidad considerable de recursos y tiempo, pero que a su vez es la clave para definir las condiciones necesarias para la operación, e incluso determinar cuáles elementos del sistema existente pueden ser reutilizados para dar una respuesta que permita soluciones que den lugar a mejoras sustanciales. En ese sentido son aspectos claves a incluir en el diagnóstico las características del material a transportar, los puntos de captación, el filtrado, el sistema de ductos y el ventilador presente.

Una vez definidas las premisas a través del diagnóstico, la fase de diseño seguirá un protocolo estricto que debe acompañarse de los métodos de validación adecuados, como por ejemplo la implementación de la simulación, vista como una herramienta que permite proyectar el comportamiento de las mejoras sugeridas frente a una problemática dada.

5. Referencias

[1] F. Santoro and J. A. Gómez, "Rediseño del sistema de aspiración del área de empacado de un proceso productivo de detergente en polvo," Trabajo Especial de grado para optar al título de ingeniero Mecánico, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2019.

[2] L. Buchelli and M. Reinoso, "Disminución de contaminantes aéreos en una planta de balanceados mediante la propuesta de un sistema de extracción

de polvo," *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, no. 12, pp. 5–14, 2014. https://doi.org/10.17163.ings.n12.2014.01

[3] D. Carmona, "Diseño de dos sistemas de extracción para humos y polvos en la empresa Cristar S.A." Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia, 2020.

[4] R. Serrano, "Recomendaciones para el mejoramiento de los sistemas de extracción neumática de residuos de madera," *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 3, no. 8, pp. 1–6, 2006.

[5] A. Zarei, M. Jahangiri, A. Koohpaei, A. Zolfaghari, A. Barkhordari, and M. Mortezavi, "Exhaust Ventilation System for the Control of Total Dust and Crystalline Silica in a Tile Manufacturing Factory," *Journal of Health Sciences & Surveillance System*, vol. 6, no. 4, pp. 165–172, 2018.

[6] G. Chitaru, M. Sandy, C. Croitoru, and F. Bode, "Local exhaust ventilation solutions for an industrial hall – Part 1 CFD analysis of the local exhaust systems," in *E3S Web of Conferences 85*, 2019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20198502012

[7] American Conference of Governmental Industrial Hygienist, *Industrial Ventilation*, 23 ed., Estados Unidos, 1998.

[8] D. Mills, *Pneumatic Conveying Design Guide*, 2 ed. Butterworth-Heinemann. Reino Unido: Elsevier, 2004.

[9] C. Echeverri-Londoño, "Diseño de filtros de talegas," *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 7, no. 12, pp. 43–60, 2008.

[10] S. Dixon and C. Hall, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*, 7 ed. Oxford, Reino Unido: Elsevier Inc, 2014. https://doi.org/

[11] G. Peralta, "Cálculo y diseño fluido dinámico de un filtro de mangas (tipo pulse-jet) para partículas minerales de origen industrial," Tesis de grado previa a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la producción. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. Ecuador, 2001.

[12] J. Salager, *Detergentes: Componentes, fabricación, fórmulas*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes, 1988.

[13] COVENIN, *Norma venezolana de ventilación de los lugares de trabajo COVENIN 2250*, COVENIN, Venezuela, 2000.

[14] A. Laya, *Manejo de fluidos*. Naguanagua, Venezuela: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, 2005.

Identification of hazard areas due to landslides on slopes due to soil saturation in the Mariño river catchment, Abancay - Apurímac

Guillermo Aguilar *,[a], Ángel Maldonado [b]

[a]*Programa de Maestría Gestión de Cuencas Hidrográficas, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.*
[b]*Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de los Andes. Apurímac, Perú.*

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.347

Abstract.- In the present research, the problem of land mass movements is analyzed through an integrating approach between saturation conditions and landslides, evaluating slope stability by the infinite slope stability model using the SINMAP program (Stability Index Mapping), this being the application of a deterministic and probabilistic method in the environment of a geographic information system, for which the geotechnical and geohydraulic data available for the study area were collected in order to create a landslide hazard susceptibility map. The analysis was carried out on a regional scale through a geographic information system, obtaining detailed information through satellite images to obtain the geotechnical and hydrological characteristics with a field evaluation. For the validation of the SINMAP model, it was calibrated based on the literature of the values obtained and a detailed inventory of superficial landslides that occurred during the last 60 years, the simulated scenario being with eight calibration regions or land uses, the simulation was quite successful in describing slope failure landslides in the study area, identifying 70,69 % of landslides, out of a total of 58 inventoried landslides in areas classified as unstable. The reliability of the simulation was assessed using a ROC curve classification model with 96,7 % overall accuracy.

Keywords: soil saturation; infinite slope; geomechanical properties; stability rate.

Identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación de suelos en la microcuenca del río Mariño, Abancay Apurímac

Resumen.- En el presente trabajo de investigación se analiza el problema de los movimientos de masa de tierra a través de un enfoque integrador entre las condiciones de saturación y los deslizamientos, evaluándose la estabilidad de taludes por el modelo de estabilidad de pendiente infinita utilizando el programa SINMAP (Mapeo del Índice de Estabilidad), siendo este la aplicación de un método determinístico y probabilístico en el entorno de un sistema de información geográfico, para lo cual se recopilaron los datos geotécnicos y geo hidráulicos disponibles para el área de estudio con el fin de crear un mapa de susceptibilidad al peligro de deslizamientos de tierra. El análisis se realizó a escala regional a través de un sistema de información geográfica obteniendo información detallada a través de imágenes satelitales para obtener las características geotécnicas e hidrológicas con una evaluación de campo. Para la validación del modelo de SINMAP fue calibrado en base a la literatura de los valores obtenidos y un inventario detallado de deslizamientos de tierra superficial ocurridos durante los últimos 60 años, siendo el escenario simulado con ocho regiones de calibración o usos del suelo, la simulación tuvo bastante éxito describiendo los deslizamiento de tierra por falla de taludes en la zona de estudio, identificando el 70,69 % de los deslizamientos de tierra, de un total de 58 deslizamientos inventariados en áreas clasificadas como inestables. La fiabilidad de la simulación fue evaluada mediante un modelo de clasificación de la curva ROC con un 96,7 % de precisión global.

Palabras clave: saturación de suelos; pendiente infinita; propiedades geomecánicas; índice de estabilidad.

Recibido: 07 de febrero, 2023.
Aceptado: 03 de abril, 2023.

1. Introducción

En diversos estudios que realizó [1], debido a la constante actividad geodinámica en la zona de estudio, y que los eventos recientes de deslizamientos en el sector de Fonavi–Moyocorral han sido materia de una evaluación geológica, geodinámica

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*aggc@lamolina.edu.pe (G. Aguilar)

y geotécnica del sector Fonavi–Abancay, en el que se indica que la ciudad de Abancay se encuentra en una unidad geomorfológica de llanura aluvial, donde muchos asentamientos humanos, se establecen sobre el piedemonte aluvial con materiales no consolidados. Así como el caso anterior muchos sectores donde también existen centros poblados se conforman de areniscas, calizas y niveles volcánicos del grupo Mitu, debido a la ubicación geomorfología, litológica y buzamiento inclinado a favor de la pendiente por lo que en la zona se producen de manera constante deslizamientos del tipo rotacional debido a la saturación de los materiales aluviales de porosidad alta.

Así mismo, en un estudio realizado para el Instituto Geofísico del Perú, presentó el informe peligro geológico en Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac en el que describe los eventos geológicos de los deslizamientos de Ccocha Pumaranra, Pucaorcco, derrumbes en la carretera Abancay–Cusco, reptación de los suelos de Moyocorral y eventos geológicos menores como el puente Chinchichaca, quebrada Ñacchero y sectores de Limapata–San Luis. Analizando el comportamiento geodinámico que se genera en la zona de estudio estableciendo los niveles de peligrosidad por efecto de la saturación de suelos y efectos sísmicos [2].

La presente investigación es un aporte al pleno conocimiento de la problemática del comportamiento de los fenómenos naturales y antrópicos, que debido a la constante actividad de la geodinámica externa del suelo en la microcuenca del río Mariño, vienen generándose diversas dificultades en el crecimiento demográfico, del cual este estudio es un aporte a la planificación del crecimiento urbano en concordancia y armonía con el entorno rural, para el manejo racional de los recursos naturales y del desarrollo sostenible en la microcuenca de estudio.

Lo que se pretende también es reorientar la tendencia del cambio de uso del suelo y al crecimiento caótico de la ciudad de Abancay; peligrosa para sus habitantes, actuando sobre la seguridad física (para reducir el riesgo) con la finalidad de que sea una ciudad sostenible y competitiva a largo plazo.

Para lograr la identificación de las zonas de riesgo por deslizamientos de laderas debido a la saturación del suelo generadas por precipitaciones en la microcuenca del río Mariño, ha sido necesario recopilar las variables hidrológicas que intervienen en la saturación de suelos así como las variables geomecánicas que intervienen en la susceptibilidad a los deslizamientos de laderas, procesándose dicha información en sistemas cartográficos y generándose mapas temáticos los que se integraron a través de un SIG las variables hidrológicas y geotécnicas para determinarse el índice de estabilidad de taludes o laderas, lográndose obtener el mapa de identificación de deslizamientos producidos por saturación de suelos.

2. Descripción del área de estudio

El ámbito de estudio corresponde a la unidad hidrográfica del río Mariño, este a su vez se ubica en la unidad hidrográfica del río Pachachaca como se presenta en la Figura 1, siendo esta unidad hidrográfica parte de la intercuenca del Alto Apurímac en el área central y oriental del territorio peruano y que conforma la red principal de drenaje de la unidad hidrográfica del río Amazonas, así mismo la cuenca del río Mariño cuenta con un área de 222,5 km^2 y un perímetro de 71,5 km.

Políticamente, comprende los distritos de Abancay y Tamburco, cuyos límites distritales está conformado por el norte con los distritos de Huanipaca y San Pedro de Cachora, por el este con el distrito de Curahuasi, por el sur con los distritos de Lambrama y Pichirhua, y por el oeste con el distrito de Huancarama este último pertenece a la provincia de Andahuaylas y los demás distritos mencionados pertenecen a la provincia de Abancay ubicado en el norte de la región Apurímac.

El área de trabajo es la cuenca del río Mariño, en la cual han realizado estudios poco detallados de estabilidad de taludes, y los estudios donde se han obtenido mapas de susceptibilidad fueron realizados métodos heurísticos que resultan de la combinación de varios factores físicos ponderados de la cuenca con ayuda de un sistema de información geográfica SIG y la función de algebra

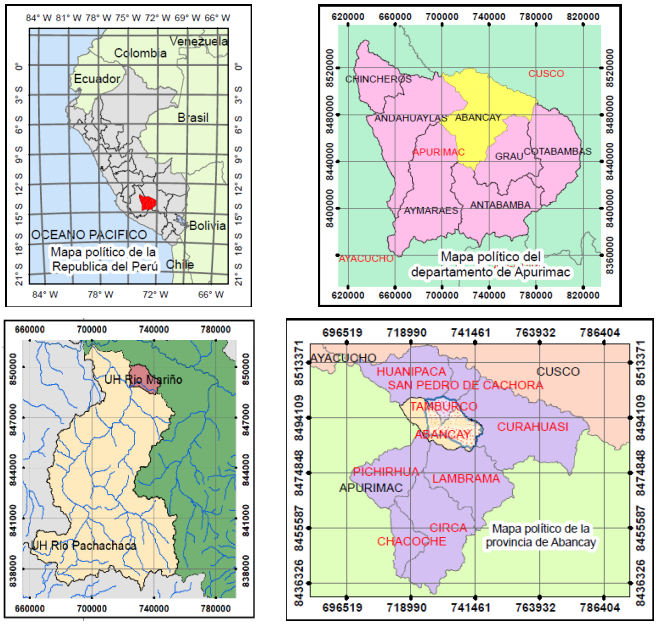


Figura 1: Ubicación espacial de la unidad hidrográfica del río Mariño

de mapas con imágenes vectoriales y raster (Spatial Analist), para elaborar mapas de estratificación de niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

3. Materiales y métodos

La metodología considera una combinación de procesos determinísticos y probabilísticos en base a parámetros físicos y variables climáticas a fin de lograr áreas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos mediante el cálculo del índice de estabilidad evaluados en base a los factores causantes de dichos eventos (Figura 2). La información de las variables y parámetros han sido compilados mediante el sistema de información geográfica [3].

El modelo de susceptibilidad combina distintos mapas temáticos, mediante la aplicación de la función de probabilidad denominada factor de seguridad, y con dicho parámetro se obtiene el mapa de estabilidad de taludes o laderas, el cual se generó a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), empleando el software SINMAP por su nombre en inglés: Stability Index Mapping [4].

Una vez obtenidos los índices de estabilidad de taludes o laderas se realizó una inspección comparada con el inventario de deslizamientos en la cuenca el cual sirvió para calibrar el mapa de susceptibilidad y por consiguiente su validación para poder obtener el mapa de predicción de deslizamientos.

Metodología

El índice de estabilidad (SI) fue mapeado en base a seis clases: estable, moderadamente estable, casi estable, umbral inferior de estabilidad, umbral superior de estabilidad y defensa. De acuerdo con [4], el "umbral inferior" y "umbral superior" caracterizan a regiones donde el rango de incertidumbre de los parámetros cuantificados por el modelo representa la probabilidad de inestabilidad menor o superior al 50 % respectivamente.

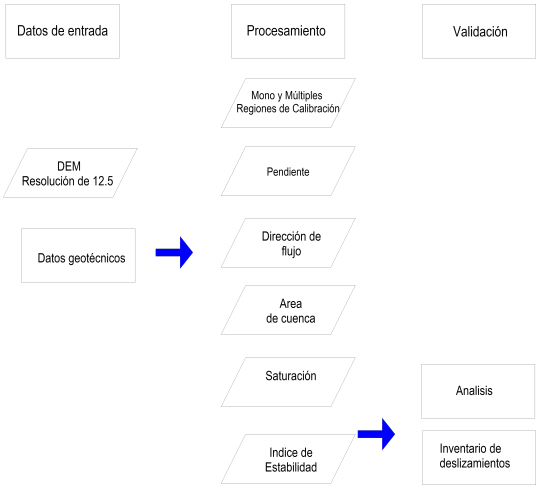


Figura 2: Diagrama de flujo de metodología generalizada que adopta diferentes enfoques de calibración basados en el modelo SINMAP (Estabilidad INdex MAPping)

El Modelo de Elevación Digital del proyecto fue obtenida a partir de la base de datos Alaska Satellite Facility (ASF-NASA), el cual es una fuente de base de datos y cuenta una estación terrestre de rastreo satelital dentro del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska, del cual se obtuvo la imagen satelital ALOS PALSAR, cuyas imágenes tienen una resolución de pixeles de 12,5 m, cuyas imágenes son de tipo ráster el cual brinda datos característicos de altitud que puede ser procesadas en imágenes geomorfológicas del área de estudio generando y obteniendo el Modelo Digital del Terreno (Figura 3). El inventario de deslizamientos

de tierra relacionados con eventos lluviosos como el de marzo del 2012, fueron mapeados con la ayuda de fotografías aéreas a escala de 1:20 000 y visitas de campo georreferenciando e inventariando en un mapa de deslizamientos. Muchas de estas evidencias están relacionadas con deslizamientos de tierra poco profundos, flujo de escombros y avalanchas, que ocurrieron en el límite entre el suelo y el basamento rocoso. Se registraron 58 evidencias de deslizamientos de tierra ocurridos en los últimos 60 años. El mapa de deslizamientos de tierra tiene la forma de un punto, formato utilizado por SINMAP (Figura 4). En la Figura 5 se muestra la frecuencia de deslizamientos de tierra según ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de deslizamiento.

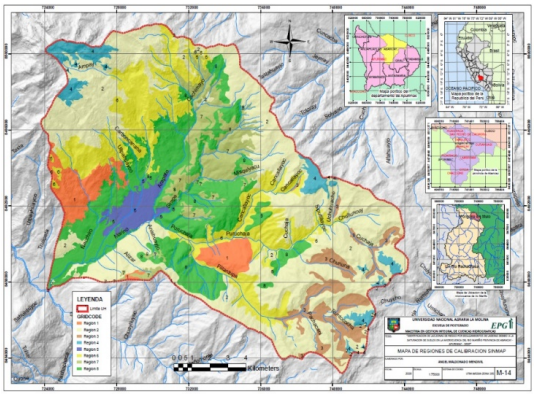


Figura 3: Mapa de regiones de calibración

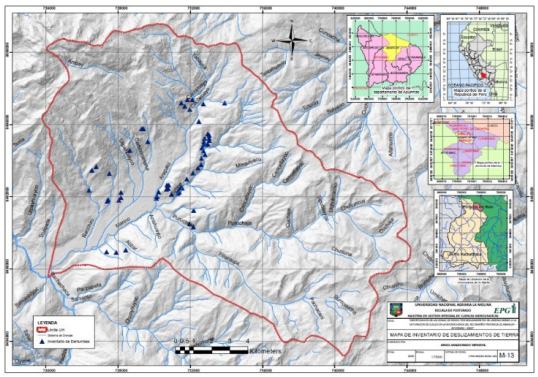


Figura 4: Mapa de inventario de deslizamientos de tierra en los últimos 60 años

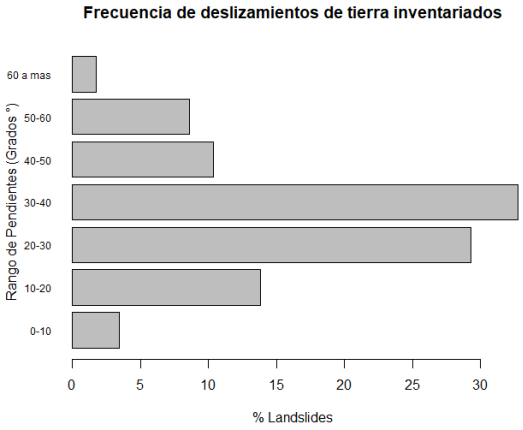


Figura 5: Frecuencia de deslizamientos de tierra inventariados en cada rango de ángulos de pendiente en la microcuenca del río Mariño

Figura 6: Deslizamiento ocurrido el 17 de marzo del 2012 en el sector de Chullurpata Tamburco

Parámetros geotécnicos y geohidráulicos

Los valores de los parámetros geotécnicos y geohidráulicos en SINMAP, fueron considerados lo descrito en la Tabla 1. Se consideró el suelo saturado como una condición inicial ya que el modelo requiere esta definición. Una vez el suelo en condición de saturado, sin embargo, la cohesión adoptada tendría un valor igual a cero, sin tener en cuenta el efecto de las raíces, por lo que se asumió valores de cohesión de 0,00 a 0,28 kPa. Para la conductividad hidráulica saturada, se atribuyó el valor de 2,0 a 3,1 cm/h, siendo estos valores el promedio de un suelo de clasificación intermedia como son arenas y grava de origen aluvial con arenas mal graduadas con grava con pocos finos y sin finos, que caracteriza a suelos con más probabilidad de falla por la excesiva saturación debido a altas tasas de infiltración (https://www.geotesting.info/parameter/soil-porosity.html), el espesor de suelo fue 1,5 m en promedio ya que los deslizamientos en

promedio empiezan con espesores de 0,5 a 3,0 m.

Transmisividad (T)

El valor de la transmisividad se determinó como el producto del coeficiente de permeabilidad multiplicado por el espesor de suelo saturado. Para el modelo con resolución de pixel de 12,5 m, el área fue 156,25 m^2 y la acumulación de flujo fue determinada con la Ley de Darcy (Q_{in} en m/s). Según [5], el flujo o caudal en celdas del flujo acumulado de un mapa ráster para un SIG se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación (1):

$$Q_{in} = \frac{q_R \cdot FlowAcumulation \cdot cellsize^2}{t_R} \quad (1)$$

Donde q_R es la cantidad de lluvia (en metros) y t_R es la duración de la lluvia (en segundos). Si la lluvia proviene de una sola estación meteorológica, R es en número que representa la cantidad de lluvia a lo largo de la duración del evento en el tamaño de la celda.

Sin embargo, para una celda ($FlowAcumulation = 1$) se tiene la ecuación (2):

$$Q_{in} = \frac{q_R \cdot cellsize^2}{t_R} \quad (2)$$

Considerando el mismo criterio por analogía a la ecuación de la transmisividad es expresada a través de la ecuación (3):

$$T = K_a \cdot D \cdot cellsize^2 \quad (3)$$

Donde K_a es el coeficiente de permeabilidad en m/día, D es el espesor saturado del suelo en metros y $cell.size$ es el factor de escala que depende de la resolución del DEM, en este caso 12,5 m, así se obtuvieron valores de transmisividad por pixel (imagen ráster), con el valor correspondiente a toda su área y la relación T/R dividiendo la transmisividad entre la recarga R (precipitación en m/día), obteniéndose valores de esta relación que están considerados en [6, 7], al momento de calibrar el modelo SINMAP. También es importante indicar que los valores se encuentran comprendidos entre 2000 y 3000 que corresponden a un rango de precipitación real en la cuenca entre 50 y 30 mm/da [8], para este caso el rango determinado es de 1750 a 2650, valores conservadores ya que el programa SINMAP puede simular con valores de la relación T/R desde un rango de 1 a 30 000,00 para intensidades de precipitación promedio de 20 a 100 mm/h [9]. Además la relación T/R, es muy sensible a la variación de los coeficientes de permeabilidad y se debe tener cuidado en la obtención de este valor ya que requiere de mucha experiencia la interpretación de dichos valores para obtener una modelación adecuada y real (Tabla 1).

Recarga Neta (R)

El valor de R (Recarga Neta) fue asumida considerando la precipitación máxima de 24 horas y para 100 años de tiempo de retorno, así como el suelo en condiciones saturadas [10]. Los valores de la T (Transmisividad), fueron considerados homogéneos para las ocho regiones. Estos valores han sido ordenados para una máxima extensión de zona potencialmente inestables sin embargo al tener poca información de permeabilidad se ha considerado un valor medio de $5{,}5 \times 10^{-4}$ a $8{,}3 \times 10^{-4}$ cm/s para las ocho regiones del modelo, tomando en consideración la evaluación realizada por Gómez [2] en la cuenca del río Shullcas, con valor de tasa de infiltración aproximada igual a 2,07 cm/h ($5{,}5 \times 10^{-4}$) que están dentro del rango asumido de la permeabilidad.

La validez del rango de valores de los parámetros del suelo obtenidos de la correlación empírica fue verificada con valores estándar aceptados en textos de ingeniería geotécnica. Luego se calcularon los parámetros del modelo SINMAP a partir de estas propiedades del suelo (Tabla 2). La fricción interna del suelo, es una de las propiedades que se obtuvo de la literatura disponible [12, 13], ensayos y estudios realizados en la zona del proyecto (Tabla 3). El rango de cohesión se derivó de la cohesión del suelo y el peso unitario, con los valores mínimos y máximos de la cohesión de las raíces extraídas de estudios publicados.

Relación de transmisividad (T/R)

Finalmente, el parámetro de la relación transmisividad / tasa de recarga (T/R) se calculó a partir de la conductividad hidráulica del suelo mencionada anteriormente y una tasa de lluvia de 64,52 mm en

Tabla 1: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo

Parámetros hidráulicos	MIN	MAX	Fuente
Clasificación de suelo	Arena y grava de origen aluvial (GM)	Arena mal gradada, arenas con grava con pocos o sin finos (SP)	Geotechdata.Info, 2013
Conductividad hidráulica, Ks (m/h)	2,00E-02	3,00E-02	Geotechdata.Info, 2013
Transmisividad, T (m^2/d)	0,73	1,11	
Factor de escala (Resolución 12,5 × 12,5)	156,25	156,25	Chalkias et al, 2016
Transmisividad en cada pixel (cell size), T (m^2/d)	114,17	173,44	
Recarga hídrica (lluvia en 24 horas), R (mm/dia)	64,52	64,52	Senamhi-Elaboración propia
Espesor promedio de suelo (Profundidad) Dh(m)	1,5	1,5	Observación de campo
Relación entre la transmisividad del suelo y la recarga T/R	1750	2650	

Tabla 2: Parámetros hidráulicos asumidos para el modelo [11]

Región	Descripción	Fuerza cohesiva, C(kPa)		Ángulo de fricción interna Φ (deg)		Fuerza de compresión no confinada (kPa)		Peso unitario (kN/m^3)		Conductividad hidráulica (cm/h)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depósitos aluviales heterogéneos	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
2	Residuos morrénicos heterogóneos	0	21	28	36	0	100	14,1	20,4	2	3
3	Depósitos de grano fino y arcillas	5	40	15	30	100	170	18,8	20,4	2	3
4	Afloramiento rocoso	50	200	34	45	45	190	18,8	22	2	3
5	Depósitos aluviales - suelo franco arenoso	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
6	Depósitos aluviales heterogéneos con poca vegetacion	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
7	Depósitos aluviales heterogéneos con vegetacion densa	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3
8	Depósitos aluviales heterogéneos con areas de cultivo	0	25	20	30	0	40	13,8	21	2	3

24 horas correspondiente a una intensidad de lluvia de 100 años de tiempo de retorno de la estación Abancay (Tabla 1).

Debido a la magnitud del área de estudio la recolección de muestras de suelo y las pruebas de laboratorio estuvieron fuera del alcance para definir algunos parámetros de la geología, vegetación y otros, estos fueron obtenidos de la literatura valores de diferentes autores que trabajaron en proyectos similares y se utilizaron bajo el enfoque de múltiples regiones de calibración, el área de estudio fue dividido en ocho regiones de acuerdo con las unidades litológicas del mapa y características de uso del suelo (Figura 3). En todas las regiones de calibración se utilizó como datos de entrada aceleración de la gravedad igual a 9,81 m/s^2 y una densidad del suelo húmedo igual a 2000 (kg/m^3). Adicionalmente, teniendo en cuenta lo sugerido por [12, 13], el valor promedio de la profundidad del suelo paralelo al nivel freático fue igual a 1,50 m para la totalidad de área de estudio.

4. Resultados y discusión

La información topográfica es muy importante para el modelo por lo que opto por trabajar con una resolución de 12,5 m para el DEM obtenido y fue muy útil para el procedimiento del cálculo de la estabilidad de laderas y taludes, basados en

Tabla 3: Parámetros geomecánicos asumidos para el modelo. [11, 14, 15]

Región	Descripción	T/R (m)		Densidad de suelo (kg/m^3)		Cohesión (Adm)		Ángulo de fricción interna, Φ (deg)	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	Depósitos aluviales heterogéneos	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
2	Residuos morrénicos heterogéneos	1750	2650	1437,3	2079,5	15	0,47	25	35
3	Depósitos de grano fino y arcillas	1750	2650	1916,4	2079,5	0	0,42	15	30
4	Afloramiento rocoso	1750	2650	1916,4	2242,6	0,12	0,25	30	35
5	Depósitos aluviales - suelo franco arenoso	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
6	Depósitos aluviales heterogéneos con poca vegetación	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
7	Depósitos aluviales heterogéneos con vegetación densa	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30
8	Depósitos aluviales heterogéneos con áreas de cultivo	1750	2650	1406,7	2140,7	0,12	0,28	20	30

Supuestos utilizados en la ejecución de calibración de modelo
R = tasa de lluvia = 0,002688 m/h (64,52 mm en 24 horas que corresponde a un período de retorno de 100 años)
Espesor de suelo = 1,5 m Aceleración de la Gravedad = 9,81 m/s^2
Cr = cohesión de la raíz (min) y 5 kPa (max)

modelos físicos y comprobar su validez a través de la calibración.

Debido a que el estudio de investigación es de carácter regional, la existencia de incertidumbres en la determinación de los parámetros geotécnicos e hidrológicos a nivel de toda la cuenca del río Mariño es variada, aun en una pequeña área, parcela o región de análisis. Los valores oscilan en cierto rango de aproximación, y que la aplicación del modelo de simulación del programa SINMAP se adapta a dicha incertidumbre ya que el modelo matemático asume una distribución estadística uniforme de los parámetros asignados para determinar el valor del índice de estabilidad a través de un modelo probabilístico.

El modelo requiere del inventario de deslizamientos de tierra en el área de estudio, para ello se recopiló información de las evidencias y rezagos de deslizamientos (Tabla 4 y Figura 7), así como de la literatura local especializada e imágenes de satélite del Google Earth y visita de campo dentro del área de estudio, para el cual se identificaron un total de 58 evidencias recientes de diferente magnitud ocurridas en los últimos 60 años que pudieran ser reconocidos por el programa siendo mucho mejor los deslizamientos mayores a 156,25 m^2 de área debido a la resolución del DEM.

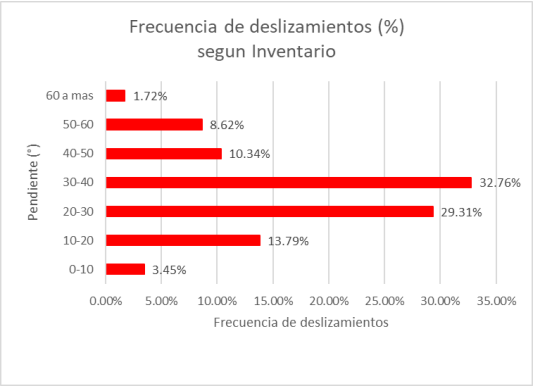


Figura 7: Frecuencia de deslizamientos según inventario

El resultado de los deslizamientos pronosticados por el modelo SINMAP es mostrado mediante la frecuencia de deslizamientos por cada rango de pendientes y región (Tabla 5 y Figura 8). Con respecto a la frecuencia de deslizamientos inventariados (Tabla 4) la mayor cantidad de deslizamientos se produce entre 10 a 60° de pendiente y según la predicción del SINMAP también existe la probabilidad de deslizamientos en zonas con pendiente menores a 10°, situación

Tabla 4: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del inventario por rango de pendientes y región

Inventario	Pendientes(°)							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a más	Total
Región 1	0	0	1	0	1	1	0	3
Región 2	0	0	0	1	0	0	0	1
Región 3	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Región 5	1	1	1	0	0	0	0	3
Región 6	0	1	1	5	0	0	0	7
Región 7	1	1	6	6	1	1	0	16
Región 8	0	5	8	7	4	3	1	28
Frecuencia de deslizamientos	2	8	17	19	6	5	1	58
Porcentaje de deslizamientos, %	3,45	13,79	29,31	32,76	10,34	8,62	1,72	100

Tabla 5: Frecuencia de deslizamientos obtenidos a partir del pronóstico del modelo SINMAP por rango de pendientes y región

Inventario	Pendientes(°)							
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60 a más	Total
Región 1	1	8	18	22	3	0	0	52
Región 2	34	85	99	58	27	4	0	307
Región 3	26	18	5	6	0	0	0	55
Región 4	3	4	9	5	1	0	1	23
Región 5	17	11	1	1	0	0	0	30
Región 6	5	33	52	45	23	1	0	159
Región 7	3	19	38	14	4	0	0	78
Región 8	35	47	49	33	8	2	0	174
Frecuencia de deslizamientos	124	225	271	184	66	7	1	878
Porcentaje de deslizamientos, %	14,12	25,63	30,87	20,96	7,52	0,80	0,11	100

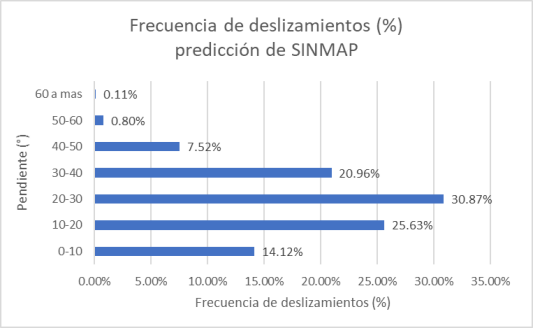


Figura 8: Frecuencia de deslizamientos según predicción de SINMAP

que requiere mayor análisis localizado ya que la incertidumbre del modelo puede generar falsas predicciones.

La fiabilidad de cada simulación fue evaluada mediante análisis ROC, que indica la necesidad de validar los modelos de predicción, a fin de garantizar las capacidades predictivas y valor científico [16].

Por lo que la simulación tuvo bastante éxito en describir la modelación de las fallas de laderas de pendiente infinita en la microcuenca del río Mariño, identificando el 70,69 % de 58 deslizamientos de tierra inventariados.

Acorde con los resultados del modelo, el 70,69 % de los deslizamientos de tierra observados fueron identificados correctamente, 32,76 % en la clase de umbral inferior de inestabilidad, 25,86 % en la clase de umbral superior de inestabilidad y 12,07 % en la clase limite muy inestable. Por otro lado, el 29,31 % fue clasificado como terreno estable, 8,62 % estable, 5,17 % moderadamente estable y 15,52 % cuasi estable.

La mayor densidad de deslizamientos fue determinada en el umbral inferior (Tabla 6) que representa el 32,76 % del territorio. Las áreas propensas a deslizamientos de tierra se

Tabla 6: inventario de deslizamientos integrados al modelo SINMAP para la calibración en las ocho regiones de la microcuenca Mariño

Total	Estable	Moderadamente estable	Cuasi-estable	Umbral inferior	Umbral superior	No definido	Total
Área (km^2)	55,6	20,1	31,2	59,9	23	6,8	196,6
Porcentaje de Región, (%)	28,28	10,22	15,87	30,47	11,70	3,46	100,00
Frecuencia de deslizamientos	5	3	9	19	15	7	58
Porcentaje de deslizamientos, (%)	8,62	5,17	15,52	32,76	25,86	12,07	100,00
Densidad de deslizamientos (#/km^2)	0,09	0,15	0,29	0,32	0,65	1,03	0,30

caracterizaron por la pendiente entre 10 a 60 grados y áreas de acumulación por debajo de 1000 m^2.

Las áreas para fallar durante el evento de marzo de 2012 incluyeron con pendientes entre 10 y 60 grados (factor de seguridad por debajo de 1) y áreas de captación por debajo de 1000 m^2. Estos resultados están de acuerdo con [17], quienes señalan que la geomorfología del área del deslizamiento de marzo del 2012, se caracterizaron por presentar fuertes pendientes (entre 30° a 45°) y que la zona montañosa, donde tuvo origen el deslizamiento de Chuyllurpata, se caracteriza por pendientes fuertes, superiores a los 30° con predominancia de farallones rocosos que condicionan favorablemente el movimiento en masa de suelo [17].

El modelo de análisis para las ocho regiones de calibración individual, contribuyeron en el resultado final de diferentes maneras. La región 1 en la Figura 9, ha contribuido con el 5,2 % de los deslizamientos de tierra, considerado como correctamente estimado. La región 2 ha contribuido con el 1,7 % de los deslizamientos de tierra. La región 3 y 4 no han contribuido debido a que dichas áreas son en su mayoría planicies altoandinas y con pendientes mínimas para generar deslizamientos de tierra. La región 5 ha contribuido con el 1,6 % de los deslizamientos de tierra, siendo esta región la zona urbana ha tenido problemas de reptación y deslizamiento de tierras en el sector de FONAVI.

La región 6 ha contribuido con más del 10,3 % de los deslizamientos de tierra que se predijeron correctamente. La región 7 también ha contribuido con más del 20,7 % de los deslizamientos de tierra y

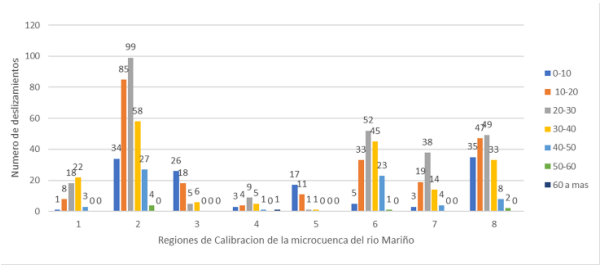


Figura 9: Número de deslizamientos de la predicción del modelo SINMAP para las 08 regiones de calibración con sus respectivos rangos de pendientes del terreno

que la mayoría de datos inventariados se predijeron correctamente dentro de esta zona y la región 8 ha contribuido más del 31,0 % de los deslizamientos de tierra, considerando también que la mayoría de los deslizamientos inventariados sucedieron dentro de esta zona.

Cabe resaltar que las regiones 3, 4 y 5 en la Figura 9 mostraron que una baja proporción de las áreas afectadas por deslizamientos se ubican en zonas con baja susceptibilidad, probablemente debido a limitaciones en la cantidad de datos inventariados, así como la falta de verificación de los parámetros geotécnicos en las regiones 2 y 3.

De la predicción del modelo, destaca la región de calibración 2 que presenta una alta probabilidad de deslizamientos por saturación del suelo, llegando a identificar de hasta 99 potenciales deslizamientos entre los 20 a 30 grados de pendiente del terreno y en mayor proporción la región 2 es la más inestable y las zonas 4 y 5 serían las más estables debido a la baja pendiente en las zonas altas y parte del valle.

Los resultados del proceso de SINMAP (Figu-

ra 10), con diferentes predicciones según el índice de estabilidad que se genera en dicho modelo, se ha obtenido que cierto número de puntos de deslizamientos se encuentran en la zona inestable ($SI > 1$). De manera que se confirma la predicción con el inventario, siendo este punto verdadero positivo (Vp) lo que sirve para calibrar el modelo según la prueba ROC.

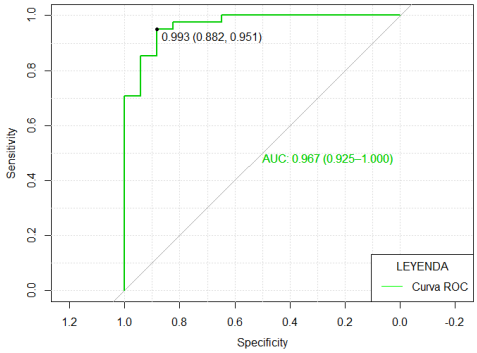


Figura 10: Curva ROC derivadas de simulaciones SINMAP con todas las regiones de calibración (verde). Área bajo la curva: 0,967 95 % CI: (0,9252-1,000)

El resultado del análisis de la curva ROC indica que la precisión global representada por el área bajo la curva (AUC) fue igual a 0,967 (Figura 10), siendo este un valor mayor a 0,50, tiene un valor de aceptación muy alto del modelo e indica que el 96,7 % de los valores corresponden a una predicción correcta y el 3,3 % de los datos el modelo predice en forma errónea.

Con el mapa del índice de estabilidad (Figura 11) y la utilización de la información temática que se encuentra en formato digital, permitió mejorar la capacidad de gestionar deslizamientos de tierra e información geomorfológica en los sistemas de información geográfica que han facilitado la preparación de modelos predictivos de deslizamientos de tierra para prevenir futuros eventos adversos.

El mapa de susceptibilidad de deslizamientos (Figura 13) fue generado a partir de las simulaciones con SINMAP, determinándose los índices de estabilidad, con una adecuada calibración de las ocho regiones. Los resultados obtenidos fueron analizados para cuantificar la discrepancia espacial

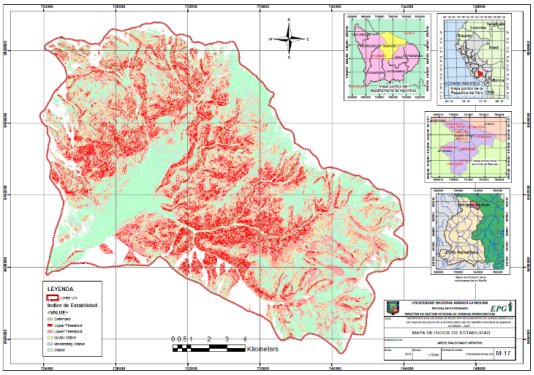


Figura 11: Precisión de la predicción del modelo SINMAP con 08 regiones de calibración

entre los deslizamientos de tierra provocados por la precipitación de diciembre a marzo que corresponden a períodos húmedos con alta saturación de suelos y su contraste con los resultados del modelo (Figura 12).

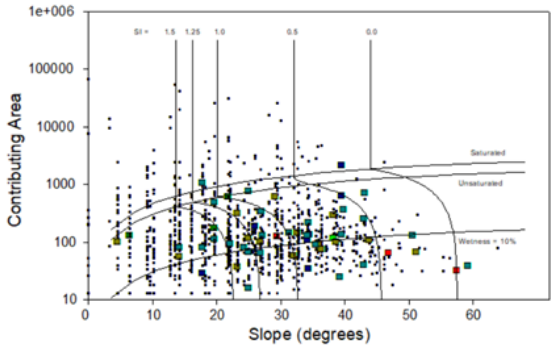


Figura 12: Gráfico de área de pendiente de deslizamientos de tierra inventariados (colores) y puntos de posibles deslizamientos (negro) vs. clases de índice de estabilidad

Una vez identificadas las zonas de derrumbes a través de su factor de seguridad o índice de estabilidad en taludes y laderas, se procedió generar el mapa de susceptibilidad en combinación con los mapas de uso potencial del suelo, uso actual del suelo y el mapa de inestabilidad, dando lugar al mapa de susceptibilidad por riesgo de deslizamientos (Figura 13).

El mapa de susceptibilidad se podrá usar en futuras evaluaciones de riesgo, con las mejoras y ajuste necesarios, mediante pruebas adicionales de campo y focalizadas en datos geotécnicos obtenidos en laboratorio, así como estudios

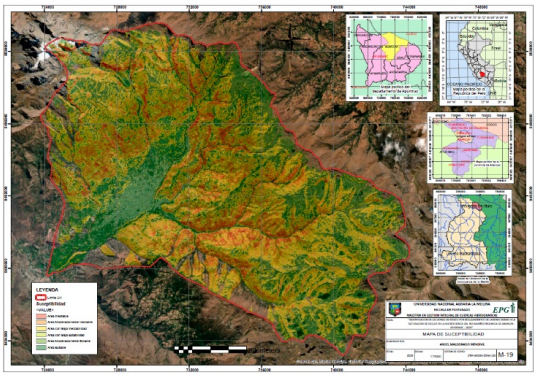


Figura 13: Mapa de susceptibilidad obtenida de acuerdo a la calibración del modelo

hidrológicos e hidrogeológicos en cada zona o región de la cuenca. La clasificación de la áreas estables e inestables de la microcuenca del río Mariño se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación de áreas estables e inestables de acuerdo al mapa de susceptibilidad en la microcuenca del río Mariño

Descripción	Área (km^2)	Porcentaje (%)
Muy inestable	8	4,06
Moderadamente inestable	23,7	12,02
Con baja inestabilidad	60,2	30,54
Con baja estabilidad	31	15,73
Moderadamente estable	20,1	10,20
Estable	54,1	27,45
Total	197,10	100,00

5. Conclusiones

Las variables hidrológicas identificadas fueron la precipitación mensual 788,12 mm, y evaporación mensual obtenidas de la base de datos PISCO, con 1093,68 mm de promedio anual, así mismo la precipitación máxima de 24 horas obtenidas de los datos históricos de SENAMHI registrados en la estación San Antonio de Abancay, igual a 64,62 mm para un tiempo de retorno de 100 años.

Las variables geotécnicas para el cálculo del factor de seguridad utilizadas en las 8 regiones de calibración fueron: la profundidad del suelo saturado igual a 1,5 m, la cohesión adimensional entre 0,0 y 0,47 considerando la cohesión de las raíces y la cohesión del suelo al grado de saturación, el ángulo de fricción interna del suelo entre 15° y 35°, los pesos unitarios del suelo entre 13,8 y 22,0 kN/m^3.

Debido al alcance regional del estudio, fue necesario recopilar y generar mapas temáticos como el de uso de suelo, uso potencial del suelo, litografía, geología e hidrografía y mapas climáticos. La información topográfica básica del Modelo de Elevación Digital (DEM) fue obtenida de la base de datos satelital ALOS PALSAR, con resolución de sus pixeles de 12,5 m. Se realizó el inventario georreferenciado de los deslizamientos de tierra ocurridos en los últimos 60 años, que fueron utilizados para la validación del modelo.

La integración de las variables hidrológicas y geotécnicas fueron realizadas con el modelo SINMAP, a fin de determinar el índice de estabilidad. Durante el cálculo se utilizó la distribución de probabilidad uniforme para definir el rango de valores de la relación transmisividad y recarga hídrica, el ángulo de fricción interna y cohesión del suelo delimitados por un límite inferior y superior. La mayor cantidad de deslizamientos fueron determinados en áreas con suelos coluviales compuestos por una matriz de suelos arenoso, con presencia de lutitas y limo arcilloso, donde el 78,0 % de los 878 deslizamientos pronosticados se encuentran entre los 10° y 50° de pendiente de ladera. Estos tipos de suelo son similares a los deslizamientos de tierra que ocurrieron en los sectores de Ccocha Pumaramra (1997) y cerro Chullyurpata (2012), y que estos deslizamientos donde el rango de pendientes varia de 10° y 50°. El modelo simulación tuvo éxito al describir el deslizamiento de taludes en la microcuenca del río Mariño y que el 70,69 % de los deslizamientos de tierra inventariados fueron clasificadas como zonas inestables, sin embargo, sobre 29,31 % del área el modelo no predice correctamente los deslizamientos de masas de tierra.

El mapa de susceptibilidad muestra 92,00 km^2 de área inestable, que representa el 46,63 % de área total. Áreas muy inestables con 8,0 km^2 (4,07 % del área total), áreas moderadamente inestables con 23,7 km^2 (12,04 % del área total) y área con

baja inestabilidad con 60,2 km^2 (30,52 % del total total) y un área estable de 105,3 km^2 que cubren el 53,37 % m del área total. Así mismo, las áreas estables han sido clasificados como áreas con baja estabilidad con 31,0 km^2 (15,73 % del área total), áreas moderadamente estables con 20,1 km^2 (10,21 % del área total) y área muy estable con 54,1 km^2 (27,43 % del área total), en consecuencia la cuenca del río Mariño es altamente inestable ya que el 46,63 % de su área es susceptible a sufrir deslizamientos de tierra provocado por la saturación de suelos, por lo que requiere un estudio focalizado de áreas muy inestables para determinar el riesgo y vulnerabilidad de zonas con asentamientos humanos, zonas urbanas, periurbanas y comunidades aledañas.

6. Referencias

[1] Instituto Geofísico del Perú IGP, "Evaluación geológica, geodinámica y geotécnica del sector fonavi – abancay," Ministerio del ambiente, Lima, Perú, Reporte técnico, 2018.

[2] J. Gómez, "Peligro geológico en tamburco provincia de abancay departamento de apurímac," Instituto Geofísico del Perú IGP, Lima, Perú, Reporte técnico, 1998.

[3] I. Cereceda, "Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos," in *Compendio de trabajos de investigación CNDG*. Perú: Biblioteca Instituto Geofísico del Perú, 2006.

[4] R. Pack, D. Tarboton, C. Goodwin, and A. Prasad, *SINMAP User's manual, A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping*. Canada: Canadian Forest Products Ltd., 2005.

[5] C. N. Chalkias, N. Stathopoulos, K. Kalogeropoulos, and E. Karymbalis, "Applied Hydrological Modeling with the Use of Geoinformatics: Theory and Practice," in *Empirical Modeling and Its Applications*, M. M. Habib, Ed. Intech Open Science, 2016, ch. 4. https://doi.org/10.5772/62824

[6] D. W. Park, N. V. Nikhil, and S. R. Lee, "Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 13, no. 11, pp. 2833–2849, 2013. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2833-2013

[7] B. Thiebes, R. Bell, T. Glade, J. Wang, and S. Bai, "Application of SINMAP and analysis of model sensitivity – case studies from Germany and China," *Revue roumaine de géographie*, vol. 60, no. 1, pp. 3–25, 2016. https://hdl.handle.net/10863/6959

[8] H. Lan, C. Zhou, L. Wang, H. Zhang, and R. Li, "Landslide Hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China," *Engineering Geology*, vol. 76, no. 1–2, pp. 109–128, 2004.

[9] M. Morrissey, G. Wieczorek, and B. Morgan, "A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in madison county, virginia," Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., USA, Report, 2011.

[10] P. Biswajeet and B. Manfred, *Terrigenous Mass Movements, Detection, Modelling, Early Warning and Mitigation Using Geoinformation Technology*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25495-6

[11] S. Mabee and C. Duncan, "Slope stability map of massachusetts," Massachusetts Emergency Management Agency, the Federal Emergency Management Agency and The Massachusetts Department of Conservation and Recreation, Massachusetts, USA, Tech Report, 2013.

[12] C. Cardozo, "A spatially integrated modelling approach to landslide risk assessment: A case study of the nova friburgo disaster - rj," Tesis Doctoral, Brazil Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Brasil, 2018.

[13] M. Marqués, R. Silva, J. Fraga, N. Coelho, and A. Sato, "The influence of vegetation cover and soil physical properties on deflagration of shallow landslides - nova friburgo, rj / brazil," in *19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April,*, Vienna, Austria, 2017.

[14] Instituto Nacional de Defensa Civil, Programa de Ciudades Sostenibles, "Mapa de peligros de la ciudad de abancay," PROYECTO INDECI-PNUD-PER/02/051, Abancay, Perú, Informe técnico, 2007.

[15] D. Apaza, *Estudio Geodinámico y Suelos del valle de Abancay – Plan Director de Abancay*, Municipalidad Provincia de Abancay Apurímac, Perú, 1997.

[16] C. Chung-Jo and A. Fabbri, "Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping," *Natural Hazards*, vol. 30, no. 3, pp. 451–472, 2003. https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b

[17] S. Villacorta y P. Valderrama, "Evaluación del flujo de detritos de tamburco, provincia de abancay, región apurímac," Instituto Geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Perú, Informe Técnico N°A6595, 2012.

Systematization of data for ecological flow modeling and its incorporation in integrated water resources management

Richard Linares-Uzcátegui *,[a], Edilberto Guevara-Pérez [b],

[a]*Subprograma de Estudios Avanzados Ciencias del Agro y Mar, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora" VIPI Cojedes, Venezuela.*
[b]*Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú (EPG-UNALM)*

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.423

Abstract.- This research deals with the systematization of data to model the ecological flow, CE. The study was carried out using the daily and monthly hydrological records of the Condorcerro gaging station of Río Santa, Peru for a period of 60 years, disaggregating the monthly series to fill in the missing values. Twenty-one CE models that use monthly mean flow records and four (4) that use daily mean flow records were applied. The NEABF, Canadian, RVA, Tennant Qe, minimum, Tennant Qe regular, Rafael Heras, French Code, Swiss Legislation, MAVDT-1, IDEAM, DGA criteria I, Fleckinger and Navarro methods yield results that are outside the operating range of the river flows. The application of the QEMR model yields values higher than the minimum operating flows (daily and monthly) in the dry season (July, August and September), and lower than the Peruvian regulations. The conclusions of the investigation are incorporated into the basin's GIRH Integral Management plan for Hydraulic Resources.

Keywords: ecological flow; daily and monthly flow regime; average daily flow; disaggregation of flows; integrated management of water resources.

Sistematización de datos para el modelamiento del caudal ecológico y su incorporación en la gestión integrada de los recursos hídricos

Resumen.- Esta investigación trata de la sistematización de datos para modelar el caudal ecológico, CE. El estudio se llevó a cabo usando los registros hidrológicos diarios y mensuales de la estación hidrométrica Condorcerro del Río Santa, Perú para un período de 60 años, desagregando las series mensuales para rellenar los valores faltantes. Se procesaron 21 modelos de CE que usan registros medios de caudales mensuales y cuatro (4) de caudales medios diarios. Los métodos NEABF, canadiense, RVA, Tennant Qe, mínimo, Tennant Qe regular, Rafael Heras, Código Francés, Legislación Suiza, MAVDT-1, IDEAM, DGA criterio I, Fleckinger y Navarro, arrojan resultados que están fuera del rango de operación de los caudales del río. La aplicación del modelo QEMR arroja valores mayores que los caudales mínimos de operación (diario y mensual) en los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre), e inferior a la normativa peruana. Las conclusiones de la investigación se incorporan al plan de Gestión Integral de Recursos Hidráulicos GIRH de la cuenca.

Palabras clave: caudal ecológico; régimen de caudales diarios y mensuales; caudal medio diario; desagregación de caudales; gestión integral de recursos hídricos.

Recibido: 26 de febrero, 2023.
Aceptado: 10 de abril, 2023.

1. Introducción

El incremento de la poblacional mundial requiere del desarrollo de nuevos esquemas de consumo que conducen al uso, explotación y alteración del régimen natural de los ríos y los ecosistemas fluviales. Esta situación ocasiona gran preocupación ambiental por lo que se vienen incorporando nuevos instrumentos y procesos para mantener la subsistencia de los ecosistemas acuáticos y de todos los hábitats.

En muchos países se han desarrollado métodos para establecer el caudal ambiental como medida de protección de los ecosistemas y su preservación, ocupando este tema un lugar central en el debate sobre gestión hídrica porque se entienden como

* Autor para correspondencia:
*Correo-e:*richardlinaresu@gmail.com (R. Linares)

una nueva herramienta para la planificación y determinación de las demandas de agua de sectores específicos [1].

Muchos de los métodos no son operados de forma adecuada, debido a la falta de datos, causando generalizaciones de las condiciones hidráulicas que no tienen ninguna semejanza con las condiciones reales y ecosistémicas de la cuenca. El cálculo del régimen de caudal ambiental sigue siendo flexible, dejando a las autoridades correspondientes libertad de decisión sobre la exigencia de un estudio técnico bien fundamentado del tema; de por medio está la afectación de la viabilidad del proyecto y si se condiciona el estudio a la conveniencia de intereses particulares [2].

El objetivo de este estudio es el de sistematizar las diferentes metodologías para la determinar el caudal ecológico, considerando que no existe un modelo perfecto único aplicable a todas las cuencas, debido a que cada una posee condiciones hidrometeorológicas, geológicas, hidrográficas y socioeconómicas muy particulares que determinan el estado del sistema, que priorizan la importancia de un proceso sobre otros y condicionan la estructura del modelo (http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf).

Se espera que la investigación proporcione criterios que conduzcan a la selección de las metodologías que mejor se adapten a la dinámica hidrológica e hidráulica de la cuenca, a las reglamentaciones de la región y a la estacionalidad del régimen fluvial del río, para que los resultados puedan ser incluidos en el plan de Gestión Integral de Recursos Hidráulicos GIRH. Así mismo, el estudio constituye un aporte académico en lo que concierne al cálculo de caudales ecológicos y que servirá como referencia para futuras investigaciones en instituciones, organismos ambientales y otras universidades, a nivel nacional e internacional.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Se estableció como ámbito de estudio la cuenca del río Santa, estación hidrográfica Condorcerro, código de estación N° 201713, ubicada en la República del Perú, Departamento Ancash, Provincia Santa, Distrito Chimbote, Latitud: 8°39′28,55″S, Longitud: 78°15′42,17″W, cuya ubicación se ilustra en la Figura 1 [3, 4].

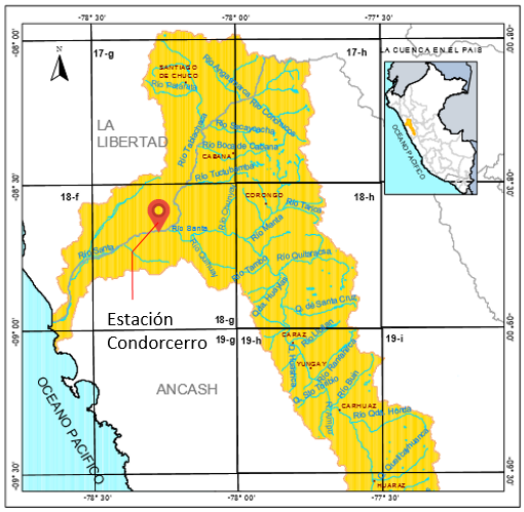


Figura 1: Localización espacial de la cuenca Santa y de la estación Condorcerro [4]

2.2. Datos hidrometeorológicos

La información hidrométrica utilizada corresponde al registro de los caudales medios mensuales de la estación 201713 Condorcerro del período 1960 - 2019 bajada de la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y al de caudales medios diarios de las estaciones C315 Condorcerro y C310 La Balsa extraídos del Sistema de Información Ambiental Regional SIAR [5] con registros faltantes. Como información secundaria se obtuvieron los datos oficiales de climatología e hidrometría [6].

La información recolectada de los registros de caudales medios mensuales y diarios se digitalizo y procesó mediante hojas de cálculo en formato Excel para la clasificación de la secuencia de datos, detección de errores, localización de datos faltantes y operación de cálculos numéricos y estadísticos del comportamiento del caudal operativo y ecológico.

Para determinar los regímenes fluviales de avenida-sequía del río Santa durante el año, se aplicó el mapa de calor (heat map chart) con el formato condicional de Excel a los registros

de caudales medios mensuales, para medir las magnitudes en escalas de colores, siendo el color verde para indicar los valores más altos o con mayor caudal y el color rojo para indicar el valores más bajos o con menos caudal.

2.3. Desagregación de las series mensuales

Para completar los registros faltantes de caudales medios diarios, se utilizó la técnica determinista lineal simple de desagregación de serie de datos mensuales. Este procedimiento desagrega los caudales mensuales a caudales diarios en la estación destino (Target Station TS) basado en el caudal mensual seleccionado en la estación origen (Source Station SS) utilizando criterios de error mínimo, que se calculan a partir de una ventana de tiempo centrada en tres meses para capturar el volumen de flujo estacional según lo adoptado [7]. La selección de contrapartes de caudal mensual histórico para la misma ventana se basa en el criterio de error relativo que se calcula con la desviación cuadrática media (Root-Mean-Square Deviation- RMSE) cuya expresión se da en la ecuación (1).

$$DCM = \sqrt{\frac{(CMTS - CMSS)^2}{2}} \qquad (1)$$

Donde:
DCM: Desviación cuadrática media.
CMTS: Caudal mensual estación destino.
CMSS: Caudal mensual estación origen.

El caudal mensual estación origen (CMSS) que se utilizará para desagregar será aquel con el menor error de la DCM en la ventana de tiempo.

El caudal índice es la relación entre el caudal diario y el caudal mensual de la estación origen como se expresa en la ecuación (2) y el caudal desagregado o caudal diario estación destino (CDTS) es el producto del caudal índice (SiSS) y el caudal mensual estación destino (CMTS) como se indica en la ecuación (3).

$$SiSS = \frac{CDSS}{CMSS} \qquad (2)$$

$$CDTS = SiSS \cdot CMTS \qquad (3)$$

Donde:
$SiSS$: caudal índice.
$CDSS$: caudal diario estación origen.
$CMTS$: caudal mensual estación destino.
$CDTS$: caudal desagregado o caudal diario estación destino.

El cálculo de los errores relativos mínimos y la desagregación se realizaron usando hojas Excel y los promedios mensuales de los caudales medios diarios disponibles. Se tomó como estaciones origen la C315 Condorcerro, período 1960–1997 y la C130 La Balsa, período 1998–2011. Como estación destino la de Condorcerro 201713, período 1960–2019, para los registros de los caudales medios mensuales. Para los caudales medios diarios de los años faltantes del período 2012 al 2019 se utilizaron los caudales medios diarios de los años anteriores incluyendo los desagregados como estación origen.

Se emplearon hojas de cálculo en Excel para la interpolación spline cúbica (ISC) en las transiciones mensuales de los caudales desagregados, utilizando la herramienta de complemento Add-in SRS1 Cubic Spline (https://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx) con los valores de los caudales diarios de los últimos 7 días del mes previo y los primeros 7 días del mes siguiente. Con este procedimiento se minimizan los saltos hidrológicos en la transición de mes a mes cuando las diferencias de caudal entre el último día del mes y el primer día del mes siguiente son superiores al 10 % [8].

La interpolación requiere establecer una serie de datos fijos dentro del rango de días de ajuste que no intervendrán en el proceso, por lo que se asignaron 4, 5 y 6 datos fijos para elegir el mejor ajuste con el menor porcentaje de diferencia en la transición intermensual.

Para verificar la fiabilidad de los registros obtenidos de la desagregación, se calcularon las desviaciones estándares (σ) anuales de los registros de caudales medios mensuales y diarios. Ambas curvas de desviaciones se graficaron en Excel usando el formato combo de dispersión para graficar los caudales medios mensuales y en barras verticales para graficar las desviaciones estándar

mensuales y diarias. Se usaron las opciones en las gráficas de Excel para mostrar las relaciones de tendencia lineal y las respectivas pendientes.

2.4. Caudales medios mensuales y diarios

Para la sistematización de los CE mensuales y diarios se procesan los datos usando cada uno los métodos hidráulicos. Los resultados de los CE se reflejan en forma mensual multi-anual. Para cada método se enlazan los resultados con la tabla resumen de CE. El procesamiento de los datos se lleva a cabo utilizando hojas de cálculo en Excel.

Métodos hidráulicos propuestos para calcular el CE a nivel mensual, río Santa, estación Condorcerro

1. Método Northern Great Plains Resource Program (NGPRP) [9]
2. Método de Índices de Curva de duración de caudales (CDC) [10]
3. Método de Tennant o Montana [11]
4. Método de New England Aquatic Base Flow (NEABF) [12]
5. Método de Rafael Heras [13]
6. Método de Texas [14]
7. Método Aquatic Base Flow (ABF) [15]
8. Hoppe [2]
9. Método del 90 % de excedencia [16]
10. Código del Medio Ambiente Francés [17]
11. Legislación Suiza [18]
12. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT) [19]
13. Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) [20]
14. Método de Matthey [14]
15. Método de las Provincias en el Atlántico de Canadá [21]
16. Método Canadiense [22]
17. Método de la Provincia de Ontario [23]
18. Dirección General de Aguas de Chile (DGA) [22]
19. Dirección General de Aguas de Chile (DGA) Ley 20.217 [24]
20. Método Fleckinger [25]
21. Método de Navarro [26]

Métodos hidráulico propuestos a nivel diarios, río Santa, estación Condorcerro

1. Método 7Q10 de Chiang y Johnson [14]
2. Método Range Variability Approach (RVA) [15]
3. Método de la Provincia de Ontario-Canadá [23]
4. Método de Caudal Básico de Mantenimiento (QBM) [27].

En el caso de los CE mensuales las metodologías se tabularon según el procedimiento de cálculo y se utilizó la CDC para los métodos 90 % de excedencia e IDEAM. En los CE medios diarios se calcularon las distribuciones de frecuencia Log-Pearson III para el método 7Q10 y el Gumbel III para el método 7Q20; se utilizó el IHA Software (http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx) para determinar los indicadores de alteración hidrológica del método RVA.

2.5. Modelo propuesto

El desarrollo del modelo propuesto en este estudio se llevó a cabo en las siguientes cinco fases de desarrollo:

Fase 1 Evaluación: Contempla la evaluación y selección de las metodologías de los CE a aplicar, tomando como criterios el descarte de aquellos métodos de CE que no describan un comportamiento ajustado a la dinámica fluvial del río y que estén por debajo del rango de operaciones hidráulicas de los caudales medios del río CMMin.

Fase 2 Consolidación: Para unificar los métodos seleccionados en la fase de evaluación, se promediaron por meses todos los CE s mensuales y diarios respectivamente y se obtuvieron los CE promedios consolidados.

Fase 3 Resultante: El producto del modelo se obtuvo con los caudales ecológicos resultantes, aplicando la media aritmética en ambos CE promedios consolidados en forma mensual y por registro.

Fase 4 Viabilidad: Permite determinar si el caudal ecológico resultante en el modelo propuesto es hidráulicamente apto en referencia a los valores medios y mínimos que el río permite, para ello se confronta el caudal ecológico promedio resultante

con los caudales mínimos y medios multianuales mensuales y con el mínimo medio diario.

Fase 5 Normativa: Para comprobar que los CE resultantes obtenidos en la fase 3 cumplen con la normativa regional, se compararon los CE resultantes (mensual y diario) y la media de los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) con los CE de la metodología del 95 % de persistencia establecida en la República del Perú [28].

3. Análisis y Discusión de resultados

3.1. Cálculos iniciales

En la Tabla 1 se presenta el comportamiento del régimen fluvial del río Santa en la estación Condorcerro. La interpretación colorimétrica de los valores de la Tabla 1 indica que anualmente el régimen fluvial del período de estiaje o caudales menores se inicia en el mes de junio y culmina en el mes de noviembre, mientras que los períodos de avenidas o crecidas se inician en el mes de diciembre y culminan en el mes de mayo.

La zona de estudio se ubica en el hemisferio sur y las estaciones astronómicas tienen una duración aproximada de tres meses; cuando el sol está directamente sobre la línea ecuatorial se producen el equinoccio de otoño lo que ocurre en el mes de marzo; el equinoccio de primavera ocurre en el mes de septiembre. Cuando el sol está sobre los trópicos de cáncer y capricornio se producen el solsticio de invierno en el mes de junio y el solsticio de verano en el mes de diciembre [28]. En la Tabla 2 se diferencia las cuatro estaciones geográficas indicadas.

Superponiendo las Tablas 1 y 2 se observa que los caudales de avenida o crecidas se producen en las estaciones de verano-otoño, mientras que las condiciones de sequía o estiaje se producen durante las estaciones de invierno-primavera. Este fenómeno ocurre porque el caudal del río Santa depende del aporte de fuentes que provienen en la época de verano de los deshielos de glaciares ubicados en la Cordillera Blanca [6] donde las precipitaciones en la cuenca alta se transforman en nieve y se acumulan como hielo glaciar impidiendo que circule el agua en los meses de invierno.

Tabla 1: Comportamiento régimen fluvial anual, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Caudal Medio Mensual *CMM* (m^3/s)
Enero	201,135
Febrero	274,480
Marzo	354,719
Abril	259,028
Mayo	107,529
Junio	60,072
Julio	46,176
Agosto	42,978
Septiembre	45,878
Octubre	65,570
Noviembre	96,119
Diciembre	143,210

Tabla 2: Estaciones astronómicas, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Estación
Enero Febrero	Verano
Marzo Abril Mayo	Otoño
Junio Julio Agosto	Invierno
Septiembre Octubre Noviembre	Primavera
Diciembre	Verano

Basado en el análisis del régimen fluvial dado en la Tabla 1 se determinan las condiciones para la calcular los CE por los métodos Tennant o Montana, método Canadiense, método Aquatic Base Flow (ABF) y método Dirección General de Aguas de Chile (DGA); mientras que los períodos estacionales indicados en la Tabla 2 forman parte de la determinación de los CE por los métodos NABF y Hoppe.

En la Figura 2 se presenta la curva de duración generada a partir de los 720 datos de los caudales mensuales. Esta curva muestra el comportamiento hidráulico del régimen fluvial para las frecuencias/magnitudes de los caudales igualados o excedidos y la proporción acumulada del porcentaje del tiempo que el caudal se excede. Esta información servirá de base para la determinación de los CE de los métodos 90 % de excedencia, 95 % de persistencia y el método IDEAM.

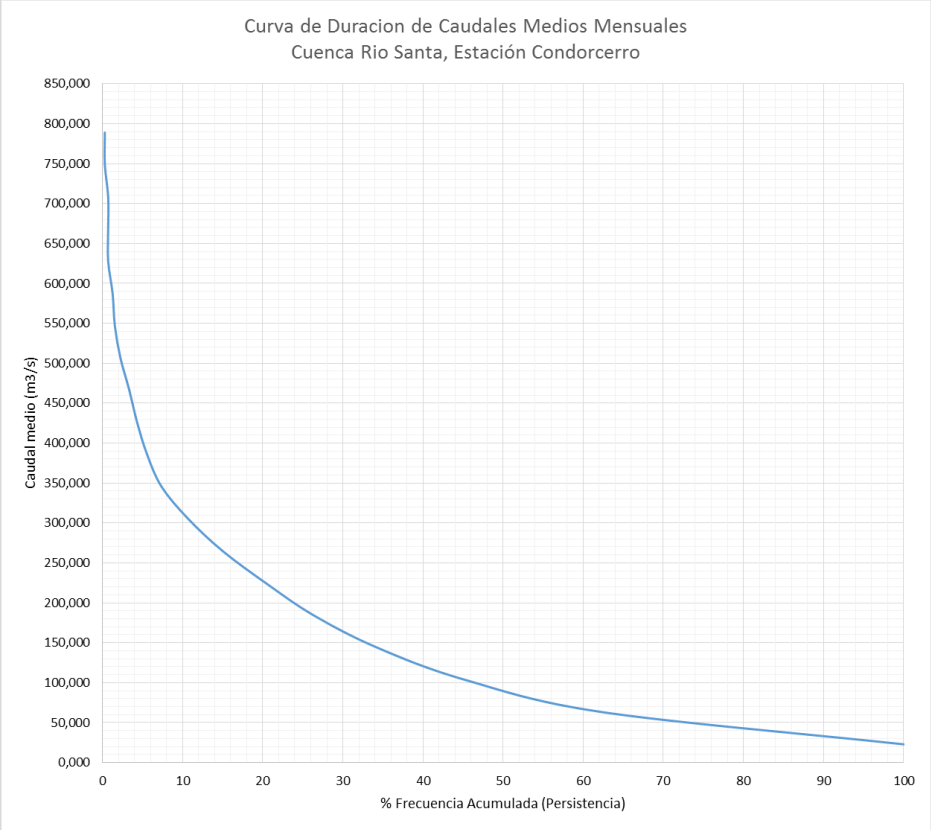


Figura 2: Curva de duración de caudales CDC, caudales medios mensuales, río Santa, estación Condorcerro

3.2. Desagregación de caudales mensuales

3.2.1. Interpolación

Luego de la desagregación de las series mensuales se realizó la interpolación spline cúbica ISC en todas las transiciones de un mes a otro de los registros de caudales diarios, utilizando un rango de 14 días de ajustes y las asignaciones de los días fijos en el rango de ajustes como se muestran en la Tabla 3 realizada en la transición de los meses Enero-febrero de 1962.

La transición entre los meses de Enero-Febrero se produce en los renglones de datos 7 y 8, y las diferencias porcentuales se obtienen de la relación porcentual que hay entre ellos. El caudal desagregado presenta una diferencia porcentual de 60,10 % que es superior al 10 % de lo recomendado, lo que amerita la aplicación de la ISC y que, a través de los datos restringidos de 4, 5 y 6 días, se definen y se grafican las diferencias porcentuales para cada caso como se muestra la Figura 3.

En la Tabla 3 se presenta la interpolación spline cúbica de los caudales medios diarios, transición Enero-febrero 1962 del río Santa en la estación Condorcerro. En esta tabla, programada para el cálculo de la ISC, se aprecian que los días fijos resaltados en color amarillo, para 4 días ocupan las posiciones 1, 3, 12 y 14; los días fijos para 5 días están distribuidos en las posiciones 1,4,7,12 y 14 y los días fijos para 6 días se establecieron en las posiciones 1,3,6,9,12 y 14, lo que permite a la ISC realizar el ajuste de los datos en aquellos renglones no restringidos. Los resultados porcentuales para los 4, 5 y 6 días fijos presentan una diferencia porcentual de transición del 9,27 %, 11,85 % y 36,36 % respectivamente, infiriendo que a mayor cantidad de días fijos se incrementa la diferencia intermensual de transición como se evidencia en los valores porcentuales de las interpolaciones para los días fijos 5 y 6.

En vista que las interpolaciones con 5 y 6 días fijos sobrepasan el mínimo porcentaje requerido significativamente y que la interpolación con

Tabla 3: Interpolación spline cúbica, caudales medios diarios, transición Enero-febrero 1962, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Dato	Caudal m^3/s			
		Caudal Desagregado	Caudal Interpolado 4 Datos fijos	Caudal Interpolado 5 Datos fijos	Caudal Interpolado 5 Datos fijos
Enero	1	900,20	900,20	900,20	900,20
	2	649,48	752,79	801,01	703,84
	3	618,28	618,28	719,70	618,28
	4	674,15	507,10	674,15	708,99
	5	886,37	419,67	672,96	859,93
	6	909,71	353,93	687,46	909,71
	7	679,74	307,82	679,74	749,29
Febrero	8	271,21	279,29	622,40	479,10
	9	251,92	266,27	530,31	251,92
	10	255,97	266,70	428,87	181,42
	11	279,44	278,51	343,52	224,67
	12	299,66	299,66	299,66	299,66
	13	323,40	327,81	312,90	342,20
	14	359,60	359,60	359,60	359,60
Diferencia		60,10	9,27	11,85	36,36

:Dato fijo

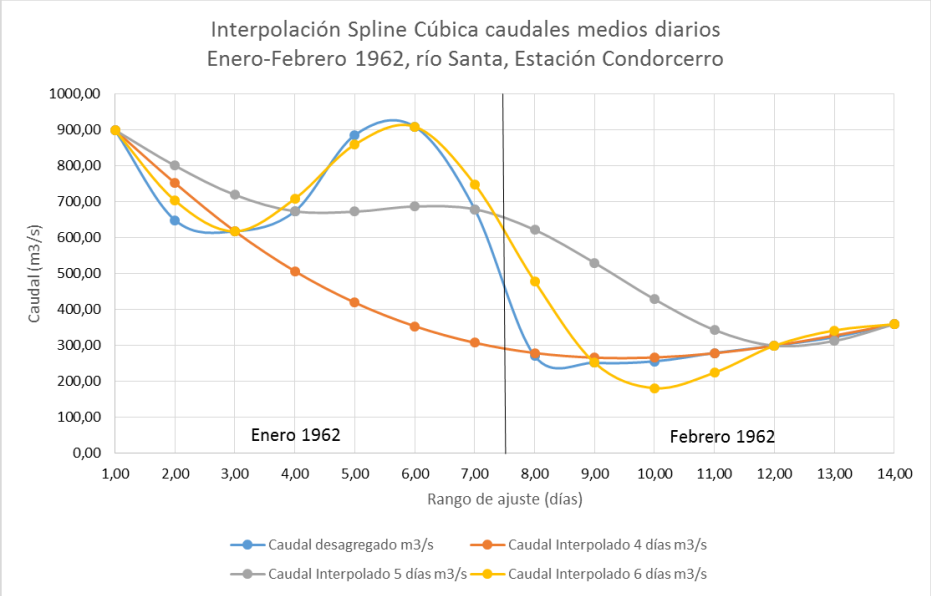


Figura 3: Interpolación Spline Cúbica en la transición de caudales diarios Enero-Febrero 1962, río Santa, estación Condorcerro

4 días fijos presenta un porcentaje menor al porcentaje de diferencia de transición requerida, se escogieron los datos de los caudales medios diarios de la transición con la interpolación de 4 días para constituirse como datos definitivos para la verificación estadística y determinación de los caudales ecológicos.

En las observaciones realizadas a las curvas de interpolación de la Figura 4, la curva de caudal interpolado de 4 días refleja un comportamiento ordenado e inscrita en una curva extendidas, mientras que la curva de caudal interpolado de 5 días es más pronunciada con cuatro curvas circulares con tendencia a un trazado medio dentro de la curva de caudal desagregado; la curva de caudal interpolado de 6 días describe una trayectoria paralela a la curva de caudal desagregado con tendencia a la invariabilidad por contener la mayor cantidad de datos fijos.

Tomando en cuenta la curva de mejor ajuste con

respecto a los datos contenidos en cada mes de datos diarios y el objetivo de suprimir los cambios bruscos en la transición intermensual de los datos de caudales diarios, se elige la curva de caudales interpolados con 4 días fijos ya que esta curva de interpolación se ajusta dentro de los 14 días del rango de transición para la interpolación con restricción de datos mínimo y equidistante para ambos meses, generando una relación promedio de afectación de datos 5/30 días para cada mes interpolado.

3.2.2. Verificación

La comprobación de los registros obtenidos de la desagregación se realizó a través de la representación de las desviaciones estándares (σ) anuales aplicados a los registros de caudales medios anuales diarios y mensuales como se muestran en la Figura 4. Así mismo para establecer las diferencias numéricas se contrastaron los caudales medios (mínimos, máximos y medios multianuales) de ambos registros como se aprecian en Figura 5.

Las desviaciones estándares anuales se muestran en las barras de la Figura 4, siendo los registros de caudales medios mensuales las barras de color naranja, los registros de caudales medios diarios las barras de color verde y la curva de caudales medios anuales se identifican en color azul.

En el análisis comparativo de las desviaciones estándar aplicado en los registros mensuales y diarios no se aprecia variaciones de valores de las barras representativas, indicando que el procedimiento de desagregación de datos para este periodo es válido. El reúso de registros de caudales medios diarios para la desagregación de datos para el periodo 2011 - 2019 no revela cambios en el comportamiento hidráulico ni variaciones que afecten el manejo de los datos, confirmando que el uso de datos anteriores con la misma dinámica hidráulica permite la desagregación de series mensuales de manera exitosa y eficiente.

Las líneas de tendencia de las desviaciones estándares para ambos registros son paralelas y descendientes como lo expresan las ecuaciones con pendientes negativas de -0.5523 y -0.5596 mostrando una diferencia porcentual entre ambas pendientes del 0.73 %, lo que infiere que ambas desviaciones estándares calculadas son semejante con una diferencia de error descartable, por lo que se considera que los registros de caudales medios diarios desagregados son aceptable y adecuados para las consecución de cálculos para la determinación de caudales ecológicos.

De la comparación de caudales medios (mínimos, máximos y medios multianuales) de ambos registros mostrados en la Figura 5 se obtiene que la variación de los promedios en los caudales máximos es del 41,16 % y de los caudales mínimos es del 28,96 %, mientras que los promedios mensuales multianuales presentan una variación de 0,055 m^3/s equivalente al 0,40 %. Estas diferencias porcentuales se generan debido a que el registro de flujos de caudales con los registros diarios refleja el comportamiento más exacto y real del río, no afectando el desarrollo de las determinaciones de caudales y procesos subsecuentes de este estudio.

3.3. CE con registros mensuales

En la Tabla 4 se muestran los CE propuestos. Los resultados se totalizaron en medios mensuales (multi-métodos) y por cada metodología en caudales medios anuales CEMA. Las gráficas comparativas por grupos de CE respecto al caudal medio mínimo mensual CMMin se ilustran en las Figuras 6, 7 y 8.

Del análisis numérico de la sistematización de la Tabla 4 se obtuvieron las siguientes observaciones:

1. El método Índice 95 % coincide en el procedimiento y los resultados con el método de 95 % de persistencia que se utiliza como referencia normativa por la legislación peruana.
2. El caudal ecológico medio anual CEMA obtenido en cada uno de los métodos Tennant Qe mínimo, Rafael Heras, ABF, 90 % excedencia, código francés, legislación Suiza, MVDT1-Colombia, IDEAM-Colombia, Provincia del Atlántico – Canadá, DGA Chile criterio I y II, Fleckinger y Navarro, mantiene el mismo valor mensual durante el año.
3. Los métodos Tennant Qe mínimo, código francés, DGA Chile criterio I y Navarro arrojan el mismo valor de 14,141 m^3/s,

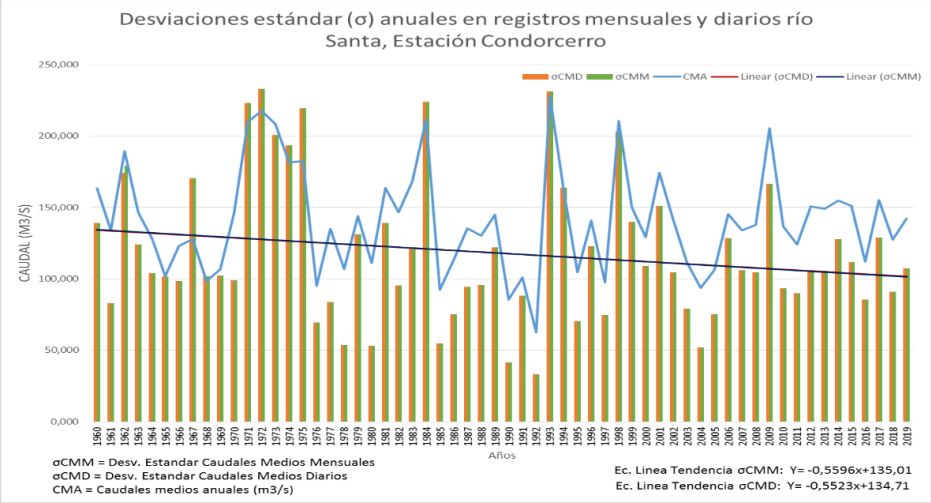


Figura 4: Desviaciones estándares anuales en caudales medios mensuales-diarios, río Santa, estación Condorcerro

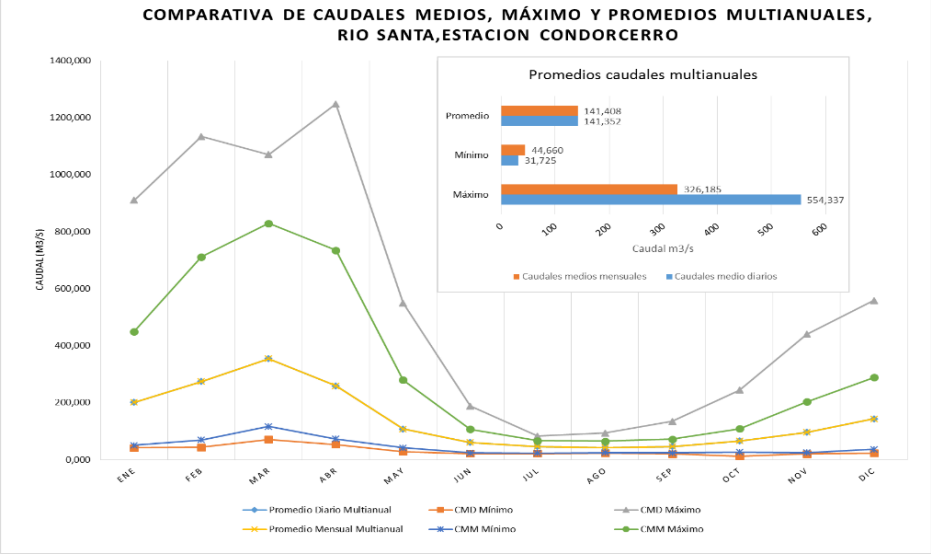


Figura 5: Promedios máximos, mínimos y promedio multianual, registros mensuales y diarios, río Santa, Estación Condorcerro

lo que indica que el método Tennant por ser más conocido por sutrayectoria se utiliza como procedimiento adoptado con otra denominación para efectos normativos o legales.

Los métodos NGPRP, Indice CDC (50 %, 90 %, 95 %), Tennant Qe (mínimo, regular, bueno, excelente, sobresaliente) y NEABF fueron representados y comparados con el caudal medio mínimo CMMin en la Figura 6 en formato lineal de Excel, del cual se destaca el trazado del método NEABF que incrementa el CE requerido a partir del mes critico de los caudales mínimos que es Agosto. Los métodos Tennant Qe (mínimo y regular) presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos Tennant Qe (bueno, excelente, sobresaliente) presentan un comportamiento mixto, con valores de CE por debajo del CMMin en la temporada de avenida y en el resto del año con valores superiores.

En los métodos de CE representados en la Figura 7 se destacan los métodos código francés,

Tabla 4: Caudales ecológicos, registros medios mensuales, río Santa, estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	CEMA
NGPRP	167,404	251,349	315,5O5	234,462	99,910	41,174	36,842	32,143	33,22	47,731	56,319	123,704	119,98
Índice CDC 50 %	175,027	256,947	327,165	241,543	100,237	57,826	46,131	42,755	45,417	62,025	85,869	129,228	130,847
Índice CDC 90 %	107,641	157,847	173,776	134,271	59,109	39,814	34,780	29,611	32,492	47,047	56,760	69,455	78,55
Índice CDC 95 %(norma Peruana)	103,168	141,739	134,355	108,184	51,925	36,656	28,572	28,673	28,222	43,500	50,390	59,978	67,947
Tennant Qe Mínimo	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Tennant Qe Regular	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	42,422	28,282
Tennant Qe Bueno	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	56,563	42,422
Tennant Qe Excelente	70,704	70,704	70,704	70,704	70,704	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	70,704	56,563
Tennant Qe Sobresaliente	84,845	84,845	84,845	84,845	84,845	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	84,845	70,704
NEABF	125,752	125,752	222,982	222,982	222,982	42,755	42,755	42,755	125,752	125,752	125,752	125,752	129,31
Rafael Heras	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784
Texas	70,011	102,779	130,866	96,617	40,095	34,695	27,679	25,653	27,250	37,215	51,521	51,691	58,006
ABF	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755
Hoppe	80,454	109,792	212,831	155,417	64,517	48,058	36,941	34,382	32,115	39,342	38,447	57,284	75,798
90 % Excedencia	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816
Código Frances	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Leg.Suiza Qe-0,5 %CMA	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873
Leg.Suiza Qe-1 %CMA	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121
Leg.Suiza Qe-l,5 %CMA	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
Leg.Suiza Qe-l,8 %CMA	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818
MVDTl-Colombia	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489
IDEAM-Colombia	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39
Canadiense	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	42,422	28,282
Prov. Atlantico - Cánada	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352
DGA - Chile Criterio 1	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
DGA - Chile Criterio 1	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282
Fleckinger 30 %CMMA Min	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893
Fleckinger 8 %CMMA	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313
Navarro	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Promedio:	49,471	60,393	73,196	62,023	42,896	26,371	24,741	24,13	27,181	29,876	32,029	42,148	41,205

legislación Suiza (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 1.8 %) CMMA y Rafael Heras que presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos ABF y 90 % de excedencia presentan una transición con el CMMin cuyos CE son menores de Enero a Mayo y superiores de Mayo a Diciembre. El método de Texas muestra dos puntos de intersección con la curva de CMMin, en el mes de Mayo cuando culmina la temporada de lluvias e inicia la de sequía y en el mes de Agosto de caudal mínimo minimorum. El método Hoppe describe el CE en forma paralela sobre la curva de CMMin.

En los CE comparativos de la Figura 8 los métodos MAVDT-1, Navarro, Fleckinger (8 %, 305) CMMA, Canadiense y DGA Criterio I

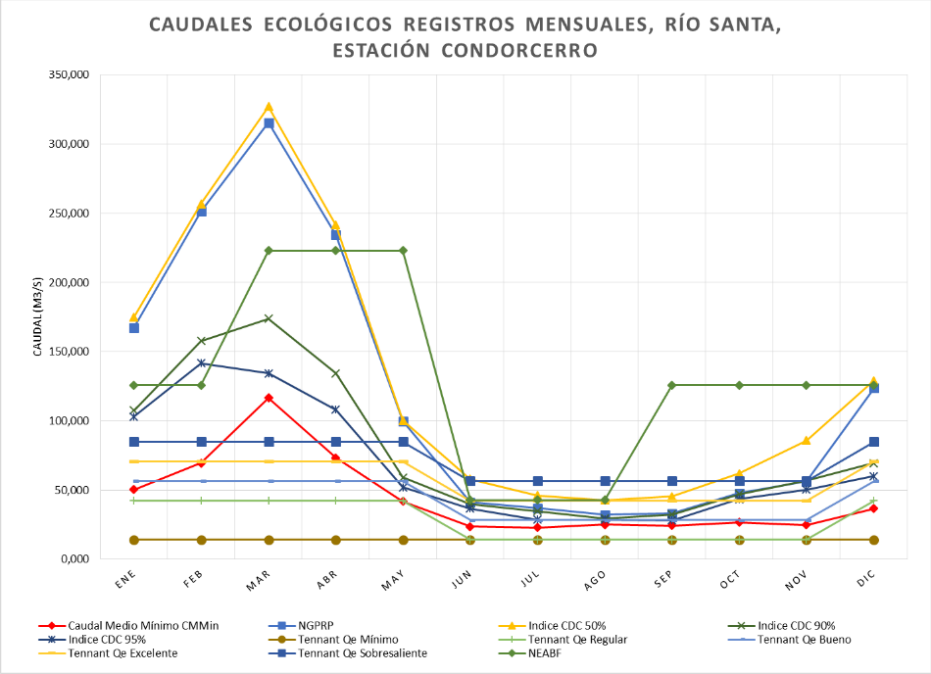


Figura 6: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcerro

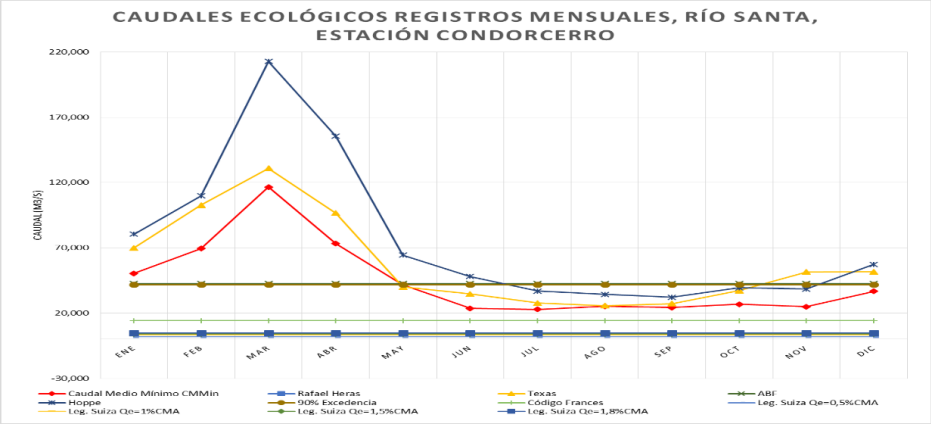


Figura 7: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcerro

presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos IDEAM, Provincia del Atlantico y DGA Criterio II muestran un comportamiento lineal bimodal en referencia al CMMin con CE inferiores en la temporada de lluvia de Enero a Mayo y CE superiores en la temporada de sequía de Junio a Diciembre.

3.4. CE con registros diarios.

En la Tabla 5 se muestran los CE propuestos. Los resultados se totalizaron de la misma manera que se hicieron con los registros mensuales. Las gráficas comparativas por grupos de CE respecto al caudal medio mínimo mensual CMMin se ilustran en la Figura 9.

Del análisis numérico de la sistematización de la Tabla 5 se destaca que el caudal ecológico medio anual CEMA obtenido en el método 7Q10 y el método Provincia de Ontario, tienen el mismo valor mensual en las distintas estaciones climatológicas del año de estudio.

Los métodos de CE obtenidos de los registros de caudales medios diarios fueron representados y comparados con el caudal medio mínimo CMDMin en la Figura 9 en formato lineal de Excel. El análisis

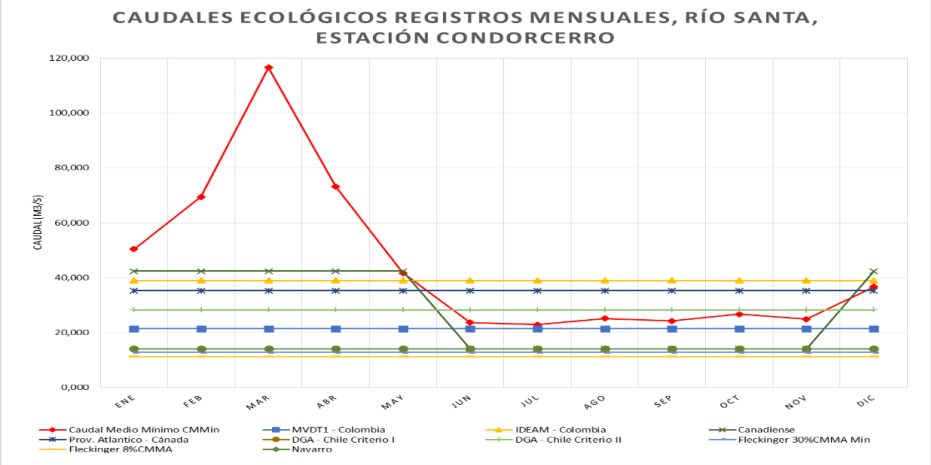


Figura 8: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcerro

Tabla 5: Caudales ecológicos, registros medios diarios, río Santa, estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	CEMA
7010	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421
RVA	91,581	120,308	163,446	119,503	44,183	17,474	9,786	8,364	10,11	18,222	38,342	63,810	58,761
Prov. Ontario	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133
Caudal Básico de Mtto.	77,599	77,237	67,770	73,084	62,338	61,910	55,145	50,765	53,426	60,829	76,288	76,711	66,092
Promedio:	66,433	73,525	81,943	72,285	50,768	43,985	40,371	38,921	40,022	43,901	52,796	59,269	55,352

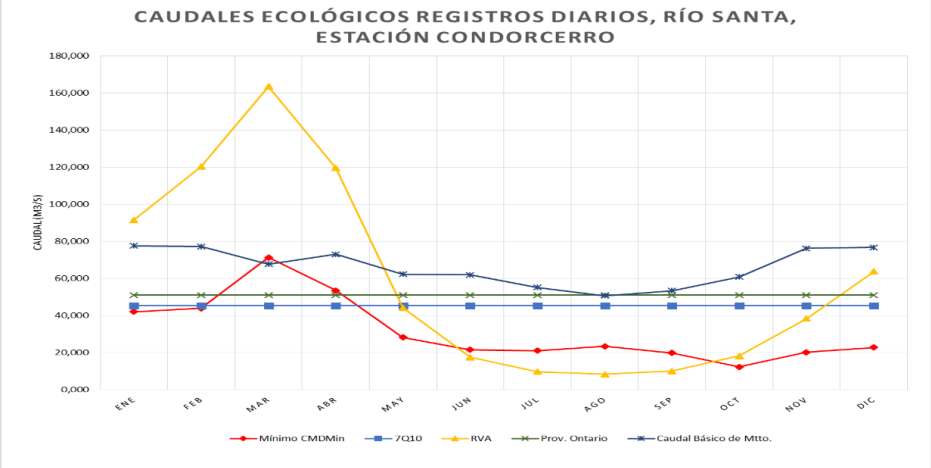


Figura 9: Caudales ecológicos de registro de caudales medios diarios, río Santa, estación Condorcerro.

grafico de cada método se describe a continuación:

1. Los CE de los métodos 7Q10 y Provincia de Ontario se expresan en forma constante durante todo el año de estudio, siendo inferiores al CMDMin de Febrero hasta Abril, el resto de los meses se mantiene con CE superiores al CMDMin
2. El método caudal básico de mantenimiento CBM mantiene valores de CE superiores al CMDMin durante el año de estudio, con una intersección inferior en el pico de máximos valores del CMDMin del mes de Marzo.
3. El método RVA estima los CE en forma variable, con valores mayores que los de CMDMin en la temporada de avenidas destacando un pico máximo en el mes de Marzo; en cambio en los meses de sequía Junio a Octubre las estimaciones del CE son

menores.

3.5. *Modelo propuesto*

El proceso de selección del modelo propuesto se realizó siguiendo lo establecido en las cinco fases de desarrollo indicadas en la metodología. En la fase de evaluación de los CE (mensuales y diarios), se descartaron los métodos NEABF, Canadiense y el RVA representados en las Figuras 6, 8 y 9 por presentar valores irregulares que inducen a variaciones atípicas que no se corresponden con el flujo normal del río. Se descartaron los métodos Tennant Qe mínimo, Código Francés, DGA criterio I y Navarro por arrojar valores repetitivos de 14,141 m^3/s; también se eliminaron las metodologías: Tennant Qe regular, Rafael Heras, Legislación Suiza, MAVDT-1, IDEAM, y Fleckinger, por arrojar valores de CE menores que el CMMin. Adicionalmente con el fin de hacer prevalecer la importancia del caudal mínimo que se produce en la época de estiaje, se incluyeron en el modelo propuesto los métodos que arrojan valores menores que los del CMMin en los meses de avenida, como son: Tennant (bueno, excelente, sobresaliente), ABF, 90 % excedencia, IDEAM, Provincia del Atlántico y DGA Criterio II, 7Q10, Provincia de Ontario y CBM.

De la fase de depuración se pasó a la fase de consolidación con los métodos no eliminados y los considerados como conformes. Así, la propuesta se conforma de los 13 métodos de CE de caudales medios mensuales que se presentan en la Tabla 6 y tres métodos de CE de caudales medios diarios que se dan en la Tabla 7. En la Tabla 8 se presentan los caudales ecológicos resultantes mensuales y por registro que constituyen la fase 3 del proceso de selección de la propuesta; en la tabla se incluye el valor absoluto objeto de este estudio.

Como se muestra en la Figura 10 el caudal ecológico promedio resultante de 58,823 m^3/s se encuentra dentro del rango de operaciones mensuales del río Santa entre el caudal medio de 141,352 m^3/s y el caudal mínimo mensual de 44,660 m^3/s y también dentro del rango de operaciones diaria del río Santa entre el caudal medio de 141,352 m^3/s y el caudal mínimo diario de 31,725 m^3/s. Se considera que estos resultados son hidráulicamente adecuados y representan bien a los valores medios y mínimos del río Santa permite.

En la Tabla 9 se presenta una comparación de los resultados obtenidos mediante el método del 95 % de persistencia y los valores dados por la normativa de la República del Perú de la fase 5 del modelo, la que justamente propone el método el mismo método del 95 % de persistencia [29]. La comparación entre los CE promedios diario y mensual mostrados en la Tabla 9 muestra que los CE de manera individual y consolidada no cumplen con la normativa regional por presentar valores menores a los establecidos en la mencionada norma. La menor variación ocurre en los CE promedios mensuales los que arrojan una diferencia del -7 %. Esto indica que los registros de caudales a ese nivel son más idóneos para el manejo normativo. Sin embargo, operacionalmente los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) son los que representan el período crítico multianual en el río Santa. En este período los caudales ecológicos resultantes arrojan valores mayores que los caudales de operación mínimos, diario y mensual, en porcentajes del 101,8 % y 79,7 % respectivamente; y al caudal ecológico estimado de 95 % de persistencia en los mismos meses en un 52,2 %. De ese modo, se establece que el caudal ecológico promedio resultante en este estudio con un valor de 58,82 m^3/s, es óptimo y viable.

4. Conclusiones

La información recabada de los registros y datos secundarios fueron los factores prevalecientes en el desarrollo de este estudio y sobre esa base se seleccionó la estación Condorcerro y un conjunto de métodos hidráulicos que utilizan registros mensuales y diarios. Por falta de información, no se pudieron incluir otras metodologías de CE que podrían ser potencialmente aplicables.

El método de Tennant que utiliza los tiempos de lluvia y sequía y el método de Hoppe que considera los periodos estacionales, fueron adaptados transformando los parámetros hemisféricos de los métodos a las condiciones de la estación

Tabla 6: Resumen consolidado de caudales ecológicos (m^3/s) para los registros mensuales del río Santa en la estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
NGPRP	167,404	251,349	315,505	234,462	99,910	41,174	36,842	32,143	33,22	47,731	56,319	123,704	119,980
Índice CDC 50 %	175,027	256,947	327,165	241,543	100,237	57,826	46,131	42,755	45,417	62,025	85,869	129,228	130,847
Índice CDC 90 %	107,641	157,847	173,776	134,271	59,109	39,814	34,780	29,611	32,492	47,047	56,760	69,455	78,55
Índice CDC 95 %	103,168	141,739	134,355	108,184	51,925	36,656	28,572	28,673	28,222	43,5	50,390	59,978	67,947
Tennant Qe Bueno	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	56,563	42,422
Tennant Qe Excelente	70,704	70,704	70,704	70,704	70,704	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	70,704	56,563
Tennant Qe Sobresaliente	84,845	84,845	84,845	84,845	84,845	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	84,845	70,704
Texas	70,011	102,779	130,866	96,617	40,095	34,695	27,679	25,653	27,250	37,215	51,521	51,691	58,006
ABF	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755
Hoppe	80,454	109,792	212,831	155,417	64,517	48,058	36,941	34,382	32,115	39,342	38,447	57,284	75,798
90 %Excedencia	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816
IDEAM - Colombia	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000
Prov. Atlantico - Cánada	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352
DGA-Chile-Criterio 1	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282
CE promedio multianual	78,787	101,412	120,987	97,844	58,222	40,907	37,53	36,263	36,656	42,238	46,698	63,618	63,43

Tabla 7: Resumen consolidado de caudales ecológicos para los registros diarios del río Santa en la estación Condorcerro (m^3/s)

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
7Q10	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421
Prov. Ontario	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133
Caudal Básico de Mtto.	77,599	77,237	67,770	73,084	62,338	61,910	55,145	50,765	53,426	60,829	76,288	76,711	66,092
CE Promedio multianual	58,051	57,93	54,775	56,546	52,964	52,821	50,566	49,106	49,993	52,461	57,614	57,755	54,215

Tabla 8: Caudales ecológicos promedios diarios, mensuales y resultantes (m^3/s), río Santa, estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
CE prom multianual diario	58,051	57,930	54,775	56,546	52,964	52,821	50,566	49,106	49,993	52,461	57,614	57,755	54,215
CE prom multianual	78,787	101,412	120,987	97,844	58,222	40,907	37,530	36,263	36,656	42,238	46,698	63,618	63,43
CE prom multianual resultante	68,419	79,671	87,881	77,195	55,593	46,864	44,048	42,685	43,325	47,349	52,156	60,687	58,823

Condorcerro, utilizando los regímenes fluviales que establecen las temporadas de avenidas y sequias y las estaciones astronómicas de los meses de verano, otoño, invierno y primavera en la cuenca. Los resultados obtenidos mediante estos métodos son los que mejor se ajustan al comportamiento hidráulico del río Santa.

El proceso de sistematización de los métodos aplicados para el cálculo del CE se relaciona con el volumen y manejo de los registros de la estación Condocerro. Para el caso de los valores mensuales se utilizaron 720 datos para las 21 metodologías;

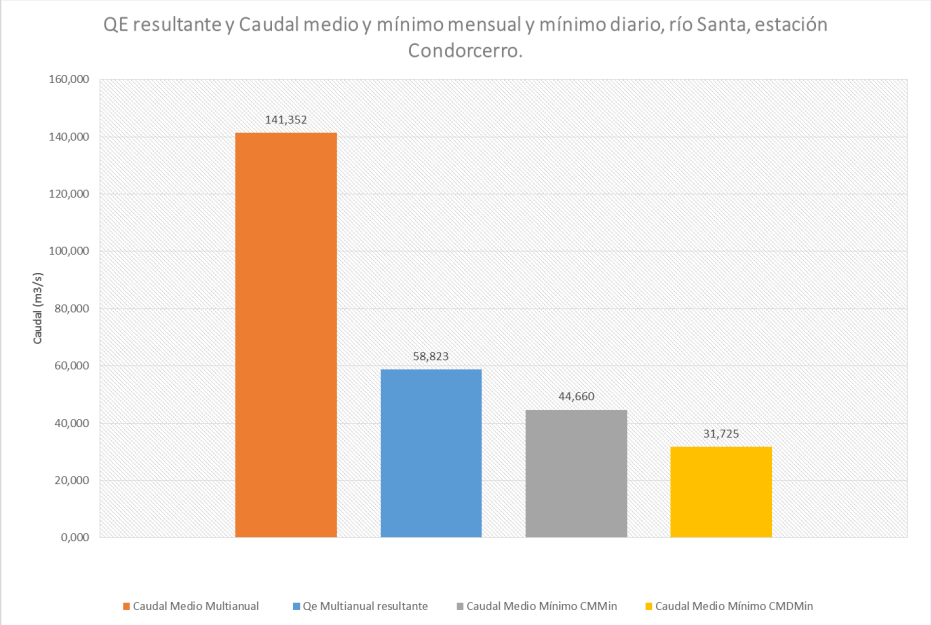


Figura 10: Comparación entre el QE resultante y el caudal medio y mínimo mensual y mínimo diario promedio, río Santa, estación Condorcerro

Tabla 9: Caudales ecológicos especificados en la norma peruana, río Santa, estación Condorcerro

	Caudal m^3/s	Porcentaje %
95 % persistencia (normativo)	67,947	
CE Promedio Diario Multianual	↓ 54,215	-20
CE Promedio Mensual Multianual	↓ 63,43	-7
CE Promedio Resultante	↓ 58,823	-13
Análisis período sequía (Jul-Agost-Sep)		
95 % persistencia (normativo)	28,489	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	52,2
Q mínimo operativo diario	21,484	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	101,8
Q mínimo operativo mensual	24,122	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	79,7

mientras que, para los CE diarios, 21915 para las 4 metodologías; de estos últimos, 4470 se obtuvieron y verificaron en el proceso de desagregación de series mensuales.

En la fase de evaluación del modelo se analizó cada método identificando los casos repetidos, los comportamientos irregulares y/o lineales, la comparación con otros métodos aplicados y se estableció el esquema de bandas de caudales de operaciones mínimo-medio mensual donde los CE puede fluctuar.

El CE resultante del análisis realizado es de 58,82 m^3/s (Tabla 9) en la estación Condorcerro. Este resultado concuerda con los caudales mínimos operativos del río, los cuales persisten en el rango de operaciones de flujo normal durante los regímenes fluviales de avenida-sequía, incorporando un factor de seguridad que garantiza mayor estabilidad hidráulica del cauce y una mejora de los hábitats en el ecosistema del río. Así se previenen riesgos de eventos climatológicos de sequía extrema como la fase cálida de El Niño costero.

5. Recomendaciones

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda el uso de los métodos de Curva de Duración de Caudales CDC y el método de Tennant o Montana para registros de caudales medios mensuales; mientras que para para registros de caudales medios diarios se recomienda aplicar el método Canadiense desarrollado para la Provincia de Ontario. Estos métodos incluyen las condiciones hidrológicas y estacionales necesarias para la estimación adecuada del caudal ecológico.

En aquellos casos con restricciones normativas para el uso de determinadas metodologías, en la estimación de los caudales ecológicos solo se podrá usar el modelo propuesto para fines de investigación.

Es necesario organizar la difusión del tema de caudales ecológicos como agente determinante del mantenimiento de los ecosistemas, a nivel académico, mediante la organización de simposios, congresos, conferencias y publicaciones científicas, que permitan divulgar los resultados de las investigaciones.

Se recomiendas motivar a las instituciones públicas y privadas para que brinden el apoyo logístico para continuar con investigaciones sobre esta importante temática ambiental.

Se requiere que los ministerios de ambiente y organismos relacionados de cada país de la región diseñen planes hidroecológicos necesarios para el sostenimiento de los ecosistemas y de los hábitats de las especies piscícolas en cada cuenca, y permitan la incorporación y actualización de las estaciones hidrométricas en las principales cuencas para el monitoreo a través de redes sistemáticas en tiempo real proporcionen la información sobre las condiciones ecológicas y niveles de los ríos.

6. Referencias

[1] M. Moreno, "Metodología y determinación de caudales ambientales en la cuenca del río Pastaza," Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniería Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.

[2] L. M. Castro, Y. Carvajal, y E. A. Monsalve, "Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental," *Ingeniería y Universidad*, vol. 10, no. 2, pp. 179–195, 2006.

[3] SEDALIB, "Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río santa como fuente de agua y servicios ecosistémicos hídricos," Perú, Reporte técnico, 2018.

[4] SIAR-ANCASH, "Cuenca Hidrográfica del Río Santa - Departamento de Ancash," Perú, Reporte técnico, 2022.

[5] SIAR-ANCASH, "Sistema de Información Ambiental Regional SIAR - Ancash," Perú, Reporte técnico, 2022.

[6] SENAMHI, "Escenarios climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030," Perú, Resumen técnico, 2009.

[7] D. Kumar, U. Lall, and M. Petersen, "Multisite disaggregation of monthly to daily streamflow," *Water Resourses Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1823–1833, 2000. https://doi.org/10.1029/2000WR900049

[8] A. Acharya and J. H. Ryu, "Simple Method for Streamflow Disaggregation," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 509–519, 2014. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000081

[9] C. C. Martínez, "Síntesis Metodológica para la Obtención de Caudales Ecológicos (Qe), Resultados y Posibles Consecuencias," Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2013.

[10] A. Silveira y G. Silveira, "Vazões mínimas," in *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*, E. M. C. João Batista Dias De Paiva, Ed. Porto Alegre: ABRH, 2001, ch. 5.

[11] ENDESA, "Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos, Un análisis de las tendencias actuales," ENDESA, Santiago de Chile, Chile, Informe técnico, 2011.

[12] D. S. Armstrong, G. W. Parker, and T. A. Richards, *Evaluation of Streamflow Requirements for Habitat Protection by Comparison to Streamflow Characteristics at Index Streamflow-Gaging Stations in Southern New England*. Reston, Virginia USA: U.S. Geological Survey, 2004.

[13] O. Brown, Y. Gallardo, P. Williams, e Y. Torres, "Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila," *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 37, no. 1, pp. 58–71, 2016.

[14] D. Moreno, "Análisis de Variables Ecohidrológicas e Hidráulicas en la Implementación de Metodologías para Determinar Caudales Ambientales en Ecosistemas de Alta Montaña y Páramo," Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2020.

[15] A. L. F. Troya, "Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos," Monografía previa a la obtención del título de Licenciada en Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 2016.

[16] Autoridad Nacional del Agua (ANA, *Diagnóstico sobre los caudales ecológicos en el Perú (primera fase): Contexto nacional e internacional*, Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 2015.

[17] République Française, Code del'environnement, *Création Loi N° 2006-1772 30/12/2006 - art. 6 JORF 31/12/2006*, París, 2006.

[18] N. Pantoja, "Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidráulicos, hidrológicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo)," Trabajo especial de grado para optar al título de Magíster en Conservación y Uso de la Biodiversidad, Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia, 2017.

[19] A. Cabra y M. F. Corradine, "Estimación del caudal ecológico por los métodos $7Q_{10}$, $Q_{95\,\%}$ y los factores de reducción del 25 % en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques," Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos, Universidad Católica de Colombia, Colombia, 2014.

[20] República de Colombia, *Proyecto de Ley de Aguas, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, Colombia, 2005.

[21] J. Caissie, D. Caissie, and N. El-Jabi, "Hydrologically Based Environmental Flow Methods Applied to Rivers in the Maritime Provinces (Canada)," *River Research and Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 651–662, 2014. https://doi.org/10.1002/rra.2772

[22] L. Berthot, A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby, and S. Ouellet-Proulx, "The use of wetted perimeter as habitat proxy to assess environmental flows in Southern Quebec rivers (Canada)," *Ecological Indicators*, vol. 132, p. 108283, 2021. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108283

[23] Government of Ontario, "Technical guidance document for surface water studies in support of category 3 applications," Ministry of the Environment, Conservation and Parks, Canada, TechReport, 2022.

[24] Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación, *Evaluación de Caudales Ecológicos en Cuencas de la IV, V y VI Región*, GeoHidrología Consultores LTDA., Santiago de Chile, Chile, 2014.

[25] D. A. Pinzón, "Revisión y Aplicación de Metodología IFIM de Caudal Ambiental al Tramo La Calera-La Cabaña del Río Teusacá," Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Clombia, 2016.

[26] M. Rustarazo, "Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos. Adaptación del método IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles," Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2000. https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.667.

[27] L. M. Castro, Y. Carvajal, y G. Céspedes, "Aplicación de la metodología de caudales básicos de mantenimiento en la Cuenca Media del río Tuluá - Subcuenca del Río Cauca," *Revista Tecnura*, vol. 16, no. 31, pp. 33–44, 2012.

[28] República del Perú, Ministerio del Ambiente, *Fechas de las estaciones astronómicas en el Perú*, Plataforma digital única del Estado Peruano, Perú, 2023.

[29] Autoridad Nacional del Agua (ANA), "Metodología para determinar Caudales Ecológicos RJ-154-2016-ANA," Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, Informe Técnico, 2016.

Tech Note. Analysis of practices of layer-by-layer use of expanded polystyrene in the operation of residential buildings

Arkady Zakharov *

Moscow State University of Civil Engineering. Moscow, Russia.

https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.444

Abstract.- The purpose of this paper is to consider three aspects of the use of polystyrene as an effective heat-insulating material in three-layer load-bearing and enclosing structures of reinforced concrete residential buildings. The first aspect is related to the dependence of the enclosure heat transfer resistance degree on the method of combining expanded polystyrene with stone structural materials. For example, prefabricated expanded polystyrene concrete blocks for the construction of walls of low and medium-rise buildings and cast-in-situ expanded polystyrene concrete poured into the voids of the well brickwork in high-rise buildings. It is shown that the layer-by-layer application of pure expanded polystyrene and the concrete layers protecting it multiplies the degree of thermal insulation of the enclosing structure while retaining its strength and equal consumption of raw materials. The second aspect is associated with the fire resistance of reinforced concrete load-bearing and enclosing structures of residential buildings. A sufficient degree of fire resistance when protecting expanded polystyrene with cast-in-situ reinforced concrete layers is shown using examples. The third aspect shows the feasibility of using outer three-layer reinforced concrete walls with polystyrene insulation for panel heating of the buildings.

Keywords: expanded polystyrene; reinforced concrete; heat transfer resistance; fire resistance; panel heating.

Nota Técnica. Análisis de prácticas de capas-por-capas usadas en la expansión del poliestireno en operaciones de construcciones residenciales

Resumen.- El propósito de este artículo es considerar tres aspectos del uso de poliestireno como material aislante térmico eficaz en estructuras portantes y de cerramiento de tres capas de edificios residenciales de hormigón armado. El primer aspecto está relacionado con la dependencia del grado de resistencia a la transferencia de calor del recinto con respecto al método de combinación de poliestireno expandido con materiales estructurales de piedra, como, por ejemplo, bloques prefabricados de poliestireno expandido para la construcción de paredes de edificios de baja y media altura y hormigón de poliestireno expandido colado in situ en los huecos de los ladrillos de los pozos en edificios de gran altura. Está demostrado que la aplicación capa por capa de poliestireno expandido puro y las capas de hormigón que lo protegen multiplica el grado de aislamiento térmico de la estructura de cerramiento manteniendo su resistencia y el mismo consumo de materias primas. El segundo aspecto está asociado a la resistencia al fuego de las estructuras portantes y de cerramiento de hormigón armado de edificios residenciales. Se muestra con ejemplos un grado suficiente de resistencia al fuego al proteger poliestireno expandido con capas de hormigón armado coladas in situ. El tercer aspecto muestra la viabilidad de utilizar muros exteriores de hormigón armado de tres capas con aislamiento de poliestireno para la calefacción por paneles de los edificios.

Palabras clave: poliestireno expandido; concreto reforzado; resistencia a la transferencia de calor; resistente al fuego; panel calefactor.

Received: January 5, 2023.
Accepted: March 28, 2023.

1. Introduction

The problems of using polystyrene in the structures of reinforced concrete buildings' walls have occurred due to the fact of the development of this material as a heat-insulation material [1, 2, 3]. It was used via mixing with concrete, pouring into brickwork wells, and finally, placing it as a separate

* Correspondence author:
e-mail: (A. Zakharov)

layer in three-layer wall structures. The work in scientific and practical terms has been carried out at the Moscow State University of Civil Engineering for many years. Consequently, theses have been defended for scientific degrees, and bachelor's, as well as master's, final qualifying papers have been presented whose results are introduced into the general practice of design and construction. Today, based on the findings of scientific research, a three-layer structure of outer walls is mainly used in construction. However, the outdated approach to providing thermal insulation via other significantly less effective methods is still maintained [2, 1].

According to modern heat engineering standards [4], the required thermal resistance of the outer wall of a residential building in the second climatic zone of Russia should be about 3 units, $m^2°C/W$. The required resistance was about 1 unit until the end of the 20^{th} century, which was provided by a wall internally plastered with a thickness of two hollow clay bricks (a little more than 0,5 m), while modern 3 units require a wall thickness of the same brick a little less than 2,5 m. It is noted that 3 units of the required thermal insulation is provided by a wall of heavy concrete with a thickness of 6 m and light concrete – about 1 m, a wall of spruce or pine – a little over 0,5 m, and slabs of foamed plastic or mineral wool with a volumetric weight of less than $100\,kg/m^3$ –about 0,15 m. The last two materials are the most effective in terms of thermal insulation. With the specified volumetric weight, their thermal conductivity coefficients do not exceed $0{,}05\,W/m \cdot C$, even under wet operating conditions.

Nowadays, due to the exorbitant thickness, the walls from the conventional materials noted above are not built. Single-layer walls from these effective heat-insulating materials are not built due to their low strength. Therefore, modern outer enclosures should only be multi-layered, wherein the effective heat-insulating layer is protected by the bearing and facing layers, which ensure the strength, durability, and fire resistance of the structure [5, 6, 7].

2. Methods

The study presented in this article is based on theoretical and practical research conducted at the Moscow State University of Civil Engineering in 2021-2022. The authors aimed to investigate the development of effective heat-insulating and protecting structural materials in the construction of outer walls of residential buildings, particularly in the second climatic zone of Russia. The correct use of expanded polystyrene (EP) as a heat-insulating layer in three-layer reinforced concrete wall structures is shown, which ensures the regulatory fire resistance of the entire structure.

The methodology involved conducting elementary calculations to compare the thermal resistance of two different design options for enclosing structures using effective heat-insulating and structural materials.

The first option consisted of uniformly mixed concrete with expanded polystyrene (EP) granules (Figure 1), while the second option involved dividing the concrete into two plates, with the EP layer located between them (Figure 2).

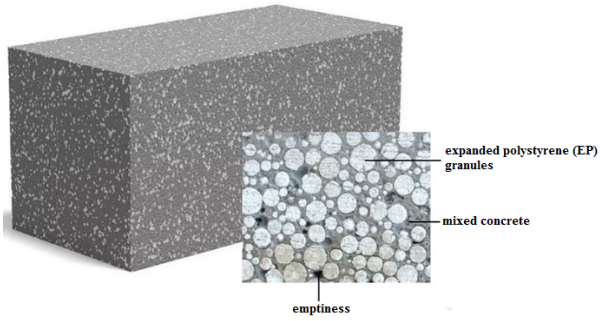


Figure 1: Concrete with expanded polystyrene (EP) granules

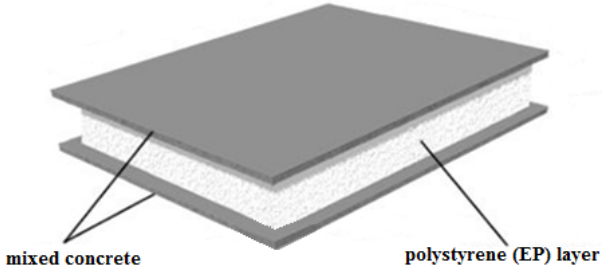
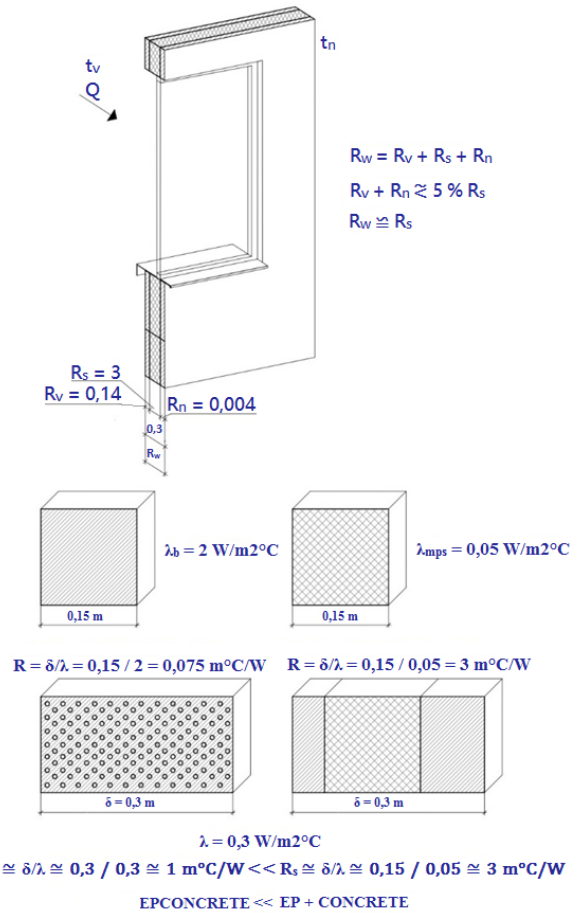


Figure 2: Concrete with EP layer located inbetween

The authors compared the thermal resistance of both options. For these two identical cubes with a side size of 0,15 m from were selected for the clarity of the experiment. This size is due to the fact that the EP layer of such a thickness provides the above-mentioned 3 units of the required thermal resistance of the wall, a fragment of which is shown in Figure 3 with a window section.



*A cube of reinforced concrete is presented in the lower half of the figure at the top left, EP is shown to the right, a mixture of reinforced concrete with EP is presented at the bottom left, and separate layers of reinforced concrete and EP are presented to the right. Symbols: λ –thermal conductivity of the material, R, R_S, and R_W –heat transfer resistance of the layer, structure, and wall, respectively.

Figure 3: Comparison of heat transfer resistance options for single-layer and three-layer walls made of the same volumes of raw materials

The cubes from these materials can be connected in two options into rectangular parallelepipeds 0,3 m long, equal to the thickness of the outer wall. Densely composed parallelepipeds form a wall uniform in terms of area, being conductor strands of the Q heat flux passing through it. In the first option, a single-layer wall consists of uniformly mixed concrete with EP granules. In the second option, the concrete cube is divided into two plates: one plate of 0,1 m thick represents the inner bearing layer of the wall; the other plate of 0,05 m thick represents the outer facing layer protecting 0,15 m thick EP layer located between the concrete plates.

3. Results and discussion

Dependence of the wall heat transfer resistance on the method of combining heat-insulating and structural material

Based on the experiment was concluded that the layer-by-layer arrangement of effective heat-insulating and protecting structural materials within the wall was necessary to maximize heat transfer resistance.

There are several rules for designing enclosing structures with effective heat-insulating materials that allow for obtaining the maximum result. The first rule follows from the consideration of two options for combining heat-insulating and structural materials. Thus, to create an energy-efficient and durable outer wall, it is enough to use two materials: EP and reinforced concrete [8].

Based in the calculations [9] presented in Figure 3, it is shown that with the same consumption of structural and heat-insulating materials, the thermal resistance of the wall made according to the second design option is three times higher than the thermal resistance of the wall made based on the first option.

The results of comparing the options demonstrate the obligatory need for the layer-by-layer arrangement of structural and heat-insulating materials within the thicknesses of the enclosing structures (first rule). This is the feature of the trend in the development of heat-insulating enclosing structures (i.e. walls and ceilings) of buildings.

Other rules refer to air voids (i.e. cavities, intermediate layers, slots, etc.) formed in the thickness of the enclosure during its construction. The number, size, and shape of the air voids depend on the materials and construction and

decoration methods. They are formed when using the dry construction method, that is, installation on the bearing layer of the wall, insulation, and facing layers, consisting of piece elements (slabs, panels, sheets, etc.). If these cavities connect with the outside air through the joints of the finishing components, the heat-protective effect of the insulating layer in the cold season can be nullified, leading to the cooling of the enclosure and the premises behind it in the hot season. The described design is called a ventilated facade; it allows for effectively drying the moisture of wall materials due to ventilation [10].

If these cavities connect with the premise air through the leaks, they may form and accumulate moisture condensate from the premise air during the cold period. Undesirable processes can be avoided by placing a vapor barrier film between the bearing and insulating layers (second rule) and by placing a windproof but vapor-permeable film between the insulating and facade layers (third rule). In this case, the ventilated intermediate layers are the flame conductors of combustible heat-insulating materials. It is possible to avoid fire spreading by installing special cut-offs in the air cavities (fourth rule) and by increasing the fire resistance of heat-insulating materials by inserting flame retardants into them (fifth rule).

With the wet construction method, it is possible to perform simultaneous concrete casting of a three-layer wall or sequenced concrete casting of the bearing layer of a wall or ceiling [11], then place and strengthen the heat-insulation material and install a monolithic screed on the floor structure or wet facade plaster on the wall. The labor intensity at the construction site is higher when using this construction method, but the formation of voids is lower and there is less work regarding eliminating their negative influence.

3.1. Fire resistance of three-layer reinforced concrete structures of residential buildings

Occasionally, there are discussions about the fire resistance of the most common effective heat-insulating materials in the form of foamed plastics, for example, the mentioned EP and mineral wool materials, on a polymer binder (hereinafter referred to as mineral wool) [12]. Authors conclude that both materials have a variety of advantages and disadvantages in terms of technological, structural, environmental, and other indicators. However, mineral wool materials are more often put at the forefront in terms of fire resistance.

Based on the research findings, authors present arguments regarding this issue.

1. EP began to be massively used in residential construction in the Soviet Union in 1960 in the outer walls of large-panel houses of the P-32 series. There were no fire problems with the walls containing EP for the semicentennial history of their operation. Most of the largest and most famous fatal fires with EP occurred in the 70-80s, following which restrictions and bans on its use were imposed in construction, which led to a decrease in its production in the country. Today, the production of EP in the world obligatory takes place with the use of flame retardants. At present, one can observe at construction sites how splashes of molten metal melt through the adjacent heat-insulating slabs of EP without causing any inflammation while welding steel structures. As practice shows, the cause of the rare fires with EP occurring now is mainly related to the failure to comply with the technology for the application of flame retardants.
2. The flammability of a construction material depends on the weight of a combustible component contained within it. The weight of glue binding a volume unit of mineral wool fiber is close to the weight of the most popular EP slabs of the M15 grade of the same volume. Thus, there are no advantages of mineral wool over EP in terms of this flammability indicator.
3. Authors witnessed an expert assessment of the results of a cottage fire set by malevolent intruders who entered the house through a broken window in the bathhouse. The cottage was built during the initial period of development of the coniferous forest territory for the settlement. The cottage was built from cast in-situ steel-reinforced concrete with three-layer outer walls and attic flooring, in which the 15-cm middle layer was made of

the M15 grade EP. The inner, bearing layer of the outer walls and reinforced concrete floors had a thickness of 10 cm, and the outer, facade layer of the walls and the attic flooring screed had a thickness of 4 cm. The bearing layer of the outer walls contained metal-reinforced plastic heating pipes and electrical wiring.

The garret roof was covered with flat sand-cement tile, and its joints ensured air draft contributing to fire spreading during a fire, providing free ventilation of the garret floor with the attic flooring hatch open and the bathhouse window broken.

The arson of the house occurred in two spots: a bathhouse located on the first floor and the second-floor bedroom located above it. The house rooms were furnished with wooden furniture in a standard way, there was firewood in the bathhouse, and chairs from other rooms were additionally brought to the premises set on fire. The arson was committed at the beginning of the week; the fading fire was discovered by the house owners a few days later, late Friday. When opening the front door, the premises were filled with smoke and soot, the carpet was smoldering on the floors. There were no people near the site during the working week. Therefore, nobody extinguished the fire.

Inspection of the house premises showed that all the wooden objects that were in the premises with fire points were burned off, and the shower cabin in the bathhouse was destroyed. A part of its plastic burned off, and the other part froze like a griddle cake on the floor. In the bedroom, with burnt wooden furniture, a TV set kinescope exploded, the steel sections of the plastic window frame were warped, plastic was partially burned off and melted, and the glass burst and fell on the floor. The major part of the carpet on the second floor and stairs burned out, leaving a lot of soot on the walls and ceilings of the rooms. The metal-reinforced plastic heating pipes and electrical wiring were not damaged, retaining their operability. When replacing the window block of the second-floor bedroom, it turned out that the heat-insulating layer of the EP was not damaged by fire.

After repairs, the major timeshare of which was the cleaning of the premises from soot and smell (over two months), the house was brought into normal operational condition. That is how the story of the fire in a reinforced concrete house ended, the effective thermal insulation of which was made entirely of EP; the fire that no one extinguished for several days and that decayed on its own did not damage the house's thermal protection.

Possibility of panel heating arrangement

The practice of application revealed another positive quality of a three-layer wall with a 10-cm internal reinforced concrete layer and a 15-cm middle layer of EP. With a two-pipe heating system, the straight and return pipes of the floor heating circuit, laid in the window sill strip of the inner reinforced concrete layer of the outer walls with a 0.5-m gap can provide comfortable panel heating of the floor without the use of any heating devices due to the thermal conductivity of the mesh reinforcing concrete (with a cell of 150×150 mm and a wire diameter of 5 mm) [10]. The thermal inertia of the reinforced concrete window sill strip of the wall-reinforced concrete layer equalizes the temperature of the premises during sharp fluctuations in the ambient air temperature.

4. Conclusion

In conclusion, it is established that the use of layer-by-layer arrangement of effective heat-insulating and protecting structural materials within the wall is a highly effective way to improve the heat transfer resistance of three-layer walls, compared to single-layer walls made with the same materials. The semicentennial experience of residential buildings with three-layer walls, where EP is used as a heat-insulating layer protected by monolithic layers on both sides, demonstrates their reliable fire resistance. Additionally, the use of three-layer reinforced concrete outer walls with an EP heat-insulating layer allows for panel heating of premises using a two-pipe floor-by-floor outline located in the windowsill strip of the inner reinforced concrete bearing layer of the wall. These findings highlight the importance of using effective heat-insulating materials in the construction of outer walls for improved thermal

efficiency, durability, and fire safety. In conclusion, the use of layer-by-layer arrangement of effective heat-insulating and protecting structural materials within the wall is a highly effective way to improve the heat transfer resistance of three-layer walls, compared to single-layer walls made with the same materials.

The semicentennial experience of residential buildings with three-layer walls, where EP is used as a heat-insulating layer protected by monolithic layers on both sides, demonstrates their reliable fire resistance. Additionally, the use of three-layer reinforced concrete outer walls with an EP heat-insulating layer allows for panel heating of premises using a two-pipe floor-by-floor outline located in the windowsill strip of the inner reinforced concrete bearing layer of the wall. These findings highlight the importance of using effective heat-insulating materials in the construction of outer walls for improved thermal efficiency, durability, and fire safety.

5. References

[1] T. R. Zabalueva and A. V. Zakharov, "About some innovative processes in modern cottage construction," *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, no. 12, pp. 20–22, 2012 (In Russian).

[2] A. V. Zakharov and T. R. Zabalueva, "Identification of approaches to architectural and structural solutions in the design of sports buildings," *Nexo Revista Científica*, vol. 35, no. 3, pp. 736–745, 2022. https://doi.org/10.5377/nexo.v35i03.15002

[3] A. V. Zakharov, *About the energy efficiency of modern enclosing structures: a collection of reports from a scientific and technical conference following the results of the International Days of Architecture*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2010.

[4] Ministry of Regional Development of the Russian Federation, *SP 50.13330.2010. Thermal Performance of The Buildings*, Russian Federation, 2003.

[5] R. Linke, S. Karcher, and T. Fort, "Energy rehabilitation of panel buildings in Russia: do not let the moment pass!" *Industrial and civil construction*, vol. 6, pp. 43–45, 2012.

[6] S. M. Glikin, *Modern enclosing structures and energy efficiency of buildings*. Moscow: State Unitary Enterprise Centre of Construction Design Products, 2003.

[7] Y. G. Granik, "Modern solutions regarding improving the thermal efficiency of building enclosing structures: a collection of reports of the international scientific and practical conference," in *Effective heat and sound insulation materials in modern construction and housing services as well as utilities*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2006.

[8] V. Khorolsky, S. Anikuev, M. Mastepanenko, S. Gabrielyan, and I. Sharipov, "Synthesis of the structure of an automated power management system in an industrial enterprise," *Journal of Management & Technology*, vol. 22, pp. 58–72, 2022.

[9] L. V. Ivanova, "Development of regulatory requirements for thermal protection of buildings," *Architecture and design*, vol. 1, pp. 33–44, 2020. https://doi.org/10.7256/2585-7789.2020.1.35796

[10] N. A. Stashevskaya and A. P. Minina, "Features of thermotechnical calculations in modern house construction," *System Technologies*, vol. 23, pp. 47–50, 2017.

[11] A. S. Nazarenko, A. V. Zakharov, and K. A. A., "Thermal engineering calculation of a three-layer coating structure with heat-conducting inclusions under various operating conditions," *Innovations and investments*, vol. 11, pp. 270–274, 2019.

[12] Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief, *Code of Rule SP 518.1311500.2022. Hinged facade systems with an air gap. Ensuring fire safety during installation, operation and repair*, Russian Federation, 2022.

Índice de materias

Symbols
índice de estabilidad, 41

B
Bio-amp, 14

C
caudal ecológico, 53
caudal medio diario, 53
ciclo cardiaco, 14
complejo PQRST, 14
concreto reforzado, 70

D
desagregación de caudales, 53

E
ECG, 14
espuma, 3
extracción localizada, 24

F
filtro de mangas, 24
formulación, 3

G
ganancia diferencial, 14
gestión integral de recursos hídricos, 53

M
material particulado, 24

P
panel calefactor, 70
pendiente infinita, 41
poliestireno expandido, 70
polvos, 24
propiedades geomecánicas, 41

R
régimen de caudales diarios y mensuales, 53
recuperación mejorada, 3
rediseño, 24
resistencia a la tranferencia de calor, 70
resistente al fuego, 70

S
saturación de suelos, 41
sistema de aspiración, 24
surfactantes, 3

Subjects index

A
average daily flow, 53

B
Bag house filter, 24
Bio-amp, 14

C
cardiac cycle, 14

D
daily and monthly flow regime, 53
differential gain, 14
disaggregation of flows, 53

E
ECG, 14
ecological flow, 53
expanded polystyrene, 70

F
fabric collector, 24
fire resistance, 70
foam, 3
formulation, 3

G
geomechanical properties, 41

H
heat transfer resistance, 70

I
improved recovery, 3
infinite slope, 41
integrated management of water resources, 53

L
local exhaust system, 24

P
panel heating, 70
powder material, 24
PQRST complex, 14

R
redesign, 24
reinforced concrete, 70

S
soil saturation, 41
stability rate, 41
surfactants, 3

Índice de autores (*Author index*)

A
Aguilar, Guillermo, 41
Almarza–Morales, Ángel, 24

G
Gómez, José Alejandro, 24
Guevara-Pérez, Edilberto, 53

H
Hernández, Inés C., 3
Hurtado, Vanessa, 24

L
Linares-Uzcátegui, Richard, 53

M
Maldonado, Ángel, 41

P
Pereira, Juan, 3

Q
Quintanilla, Andrea, 14

S
Santoro, Francisco, 24
Seijas, César, 14

Z
Zakharov, Arkady, 70

Apéndices

Línea editorial

Misión científica

Revista Ingeniería UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista Ingeniería UC es la difusión de trabajos científicos tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista Ingeniería UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por el Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

Cobertura temática

Revista Ingeniería UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la carta de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

Foro de Revista Ingeniería UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro cubre las comunidades a nivel local, Universidad de Carabobo y sus estados de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como a nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista Ingeniería UC es publicada cada cuatro meses.

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Engineering Faculty of Carabobo University.

The Revista Ingeniería UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista Ingeniería UC is subscrited to Research Direction of Engineering Faculty. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

Thematic coverage

Revista Ingeniería UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

Revista Ingeniería UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, University of Carabobo and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista Ingeniería UC is published every four months.

Políticas de ética y publicación

Introducción

Revista Ingeniería UC, como publicación científica cuatrimestral incluye tres números (Abril-Agosto-Diciembre) por cada volumen en un año, alcanza la generación continua de contenidos como principal organismo de difusión académica, científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El idioma principal de la revista es el español, manejando el inglés como segundo idioma y todos los artículos incluyen el título, resumen y las palabras clave en ambos.

Comprometidos en mantener los más altos estándares éticos, se efectúan acciones en contra de cualquier práctica anti-ética o por negligencia profesional. El plagio está estrictamente prohibido y nuestros autores y demás investigadores expresan formalmente que sus trabajos son originales, inéditos, y no están siendo sometidos a proceso de arbitraje en otras revistas, por otra parte, queda expresamente prohibida la copia o el plagio, parcial o en su totalidad, de otras obras. Todo trabajo para ser publicado cuenta con la exigencia de manera explícita a sus autores de la normativa ética de la Revista que se plasma en una *Carta de Compromiso*.

Prácticas anti-éticas y negligencia profesional

Por considerar tanto aspectos científicos como tecnológicos, se debe tomar en cuenta la necesidad de velar por la veracidad de toda información suministrada incluyendo datos técnicos, diagramas, tablas y figuras, diseños experimentales, metodologías, entre otros, siendo de vital importancia la cita a las referencias respectivas indicando con los estándares habituales cuando la información es tomada textualmente. Se consideran como faltas graves que conllevan un proceso disciplinario sancionatorio las siguientes:

a) **Copias o plagio**: presentar datos o ideas como propios, de manera parcial o en su totalidad, provenientes de otras obras.

b) **Falsificación o adulteración**: la modificación y cambio de datos presentados, omitir información de forma tal que la investigación no esté completamente presentada.

c) **Presentación de datos no verídicos**: fabricación, manipulación y presentación de información que no se desprende de datos reales derivados de la investigación.

d) **Segmentación de la investigación**: implica la fragmentación de un estudio en diversas partes con la intención de generar más de un producto con el mismo trabajo para su publicación, incluso en diferentes revistas, sin reconocer la fuente original.

e) **Alteración de autor y coautores**: la inclusión de algún miembro que no ha participado en la investigación, así como la exclusión de alguno que si lo ha realizado. De igual forma, cualquier modificación relacionada con cambios en autores y coautores, debe estar debidamente justificada; luego de finalizado el proceso de edición no será considerada.

f) **Alteración del proceso de arbitraje**: cualquier intento que afecte el proceso de arbitraje por pares a doble ciego. Se prohíbe de manera explícita la comunicación entre un árbitro y los autores del artículo.

Proceso de revisión y arbitraje

Los autores serán guiados a través de cuatro fases que conllevan la revisión preliminar, el proceso de arbitraje por pares doble ciego por árbitros externos, el proceso de edición y montaje y por último, corrección de redacción y estilo. El contenido completo de todos los

manuscritos será sometido a un proceso de revisión objetiva por parte de expertos en el área, quienes siguiendo para ello las pautas del Formato de Evaluación comunicarán los resultados obtenidos, permitiendo al Editor–Jefe conocer las recomendaciones formuladas y el veredicto respectivo. Además, el proceso de revisión es de carácter estrictamente confidencial, y los revisores no deben tener conflicto de intereses.

La revisión de los manuscritos permitirá evaluar la calidad técnica de estos en base a su originalidad y presencia de avances significativos en el campo de la ingeniería y ciencias afines, atendiendo a la pertinencia del contenido, el enfoque metodológico, los hallazgos obtenidos y a las referencias que, con respecto a contribuciones anteriores, se presentan. Tomando como premisa la debida organización de la estructura del manuscrito y el cumplimiento de las normas de presentación.

De acuerdo a los resultados de la revisión, se propone al Editor–Jefe:

- Publicación, sin cambios.
- Publicación, después de cambios menores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes respectivos de acuerdo a la evaluación.
- Publicación, después de cambios mayores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes y modificaciones requeridas según los resultados de la evaluación, sujeto a una nueva revisión.
- Publicación de una versión corta del manuscrito como Nota Técnica, en cuyo caso los autores serán notificados y ejecutarán las modificaciones a que tuviera lugar.
- Publicación en otra revista, en cuyo caso se realizará la recomendación a los autores.
- Rechazo del manuscrito para su publicación, en cuyo caso no se recibirán nuevas versiones.

Una vez concluida la revisión, el manuscrito se someterá al proceso de edición, en donde con la intención de asegurar la calidad de la publicación se podrá solicitar la condensación, supresión o incorporación de tablas, figuras, y ecuaciones, teniendo en cuenta que el comité editorial se reserva el derecho de efectuar las modificaciones pertinentes sin afectar el contenido, así como también la potestad de decidir respecto a su publicación si los autores no responden satisfactoriamente a las observaciones planteadas. El manuscrito editado, será remitido a los autores para su aprobación.

De la responsabilidad de los autores

Los autores que envían sus manuscritos para su publicación en Revista Ingeniería UC, deben someterlos a un proceso de revisión y arbitraje por pares doble ciego, y están obligados a:

- Firmar la *Carta de Compromiso*, manifestando que el contenido del trabajo enviado a la revista es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado ni redundante, además no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún otro medio de difusión, y por último que los datos presentados son originales y verídicos. Adicionalmente, el autor y los coautores ceden los derechos patrimoniales a la Revista Ingeniería UC, pero mantienen sus derechos como autores intelectuales.
- Deben evitarse o reconocerse los envíos anteriores del manuscrito a otras revistas o publicaciones, en el caso de haber sido enviado es necesario la presentación de una comunicación de la otra publicación donde se deje sin efecto el proceso de arbitraje y las motivaciones consideradas.
- Respecto a materiales/datos citados o utilizados de otras investigaciones deben documentarse cuidadosamente y citarse como referencia e indicar cuando son tomados textualmente. No es permitida la duplicación de trabajos anteriores.
- Especificar de manera clara la información relativa a las fuentes de financiamiento para el desarrollo de la investigación.

- Responder de manera oportuna a las comunicaciones que tenga lugar con el Comité Editorial.
- Cuando un error sea detectado, el autor está obligado a retractarse y efectuar las correcciones pertinentes.
- Respecto a la identificación de autores, se debe indicar el nombre tanto del autor como de los coautores, que hayan contribuido significativamente en la investigación y que estén involucrados con esta, evitando incluir personas que no estén vinculadas a la misma. Siendo además miembros de una institución de educación superior o de una estructura de investigación reconocida, suministrando información detallada relacionada con su filiación, correo electrónico de contacto y cualquier otro elemento que permita su identificación.

De la responsabilidad de los revisores–árbitros

Una vez recibido el manuscrito, acompañado de las Normas de Publicación y el Formato de Evaluación previsto por Revista Ingeniería UC, los árbitros están en la obligación de informar de manera expedita, si se acepta o rechaza la revisión del mismo explicando los motivos. En el caso de que los árbitros tengan interés intelectual o material relacionado al manuscrito bajo revisión, estos deberán inhibirse de manera voluntaria evitando así Conflicto de Intereses.

Los árbitros deberán rechazar la revisión de manuscritos, cuando estos estén fuera de su área de experticia o de especialización técnica y científica. Por otro lado, los árbitros o revisores deben completar debidamente el Formato de Evaluación previsto así como también realizar las observaciones que considere pertinentes sobre el manuscrito evaluado, lo cual incluye todas aquellas propuestas tendentes a mejorar cuando sea el caso aspectos metodológicos, la presentación y análisis de resultados y la incorporación de investigaciones de referentes de importancia que hayan sido omitidos por los autores o que debieran ser tomados en consideración, tomando en cuenta que el envío de dicha información al Editor–Jefe es de carácter obligatorio y estrictamente confidencial.

De la responsabilidad de los miembros del Comité Editorial

El Editor–Jefe de Revista Ingeniería UC, realizará una revisión preliminar al recibir el manuscrito, atendiendo a las características de la línea editorial correspondiente. Una vez superada dicha revisión, se procederá a proponer a los revisores o árbitros de acuerdo al área de conocimiento.

El Editor–Jefe será el responsable de enviar las comunicaciones respectivas a los autores, con respecto a las observaciones emitidas por los árbitros o revisores, y conducir el proceso para que se tomen medidas correctivas. Así mismo, decidirá finalmente sobre la aceptación o no del manuscrito en atención a los comentarios de los árbitros o revisores designados. El Comité Editorial tratará la información relacionada con los artículos con criterios de estricta confidencialidad.

El Comité Editorial velará por el cumplimiento de las prácticas de ética. Además realiza un esfuerzo por identificar e impedir la publicación de artículos que involucren malas conductas durante la investigación. De igual manera, se debe tratar cualquier tipo de acusación o señalamiento de manera responsable y dar inicio al proceso de sustanciación del expediente con las averiguaciones a las que se tenga lugar y se decidirá si es necesario un proceso disciplinario que conlleva:

- Amonestación: se envía a los autores una carta con las conclusiones del proceso disciplinario.
- Artículo retractado: se incluirá una carta de exposición de motivos con las conclusiones del proceso disciplinario, y el artículo será marcado con una nota de retractación.
- Suspensión: se le notifica a los autores que no serán recibidos manuscritos para su publicación mientras dure la sanción correspondiente.

.

El Comité Editorial es responsable de la publicación de cualquier nota, crítica razonable, fe de errata o disculpas con respecto a los manuscritos publicados en números anteriores.

Control de plagio

Revista Ingeniería UC utiliza para el control de plagio la revisión pormenorizada del informe generado a través de una combinación de herramientas disponibles, específicamente plag.es y Plagiarism Checker by Quetext, adicionalmente a través de búsqueda avanzada en Google que incluye verificación de tablas, ecuaciones y figuras.

Preservación digital

Revista Ingeniería UC utiliza para la preservación digital de sus artículos, el resguardo con archivo comprimido en formato LaTeX, además a través de Marcalyc 2.0 realiza el marcaje obteniendo archivo XML según estándar JATS. Además, incorpora PKP Preservation Network Plugin.

Licencia Creative Commons

Licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obras derivadas 4.0 Internacional

Ethics and Publication Policies

Introduction

Revista Ingeniería UC, as a quarterly scientific publication includes three issues (April-August - December) for each volume in a year, reaches the continuous generation of contents as principal media of diffusion academic, scientific and technological of the Faculty of Engineering at Carabobo University. The primary language of the journal is Spanish, managing English as a second language, all articles include title, abstract and keywords in both.

Also, committed to maintain the highest ethical standards, are performed actions against any anti-ethics practice or professional negligence. Plagiarism is strictly forbidden and our authors and other researchers must express formally that their manuscripts are original, unpublished, and not have been submitted to arbitration process in other journals simultaneously. In the other hand, is expressly forbidden the copying or plagiarism, partially or in its entirety, of other works. An article to be published has as requirement knowledge by the authors of the ethic policies, that are reflected in the signing of "*Compromise Letter*".

Anti-ethics practices and professional negligence

Due scientific and technological aspects, Revista Ingeniería UC needs to ensure the veracity of all information provided including technical data, diagrams, tables and figures, experimental designs, methodologies, among others, being vital the cite of the respective references indicating with the usual standards when the information is taken verbatim. Considering as serious faults involving a disciplinary process:

a) **Copy or plagiarism**: present data or ideas as own, partially or entirety, from other works.

b) **Falsification or adulteration**: modification or change presented data. Omitting information in such way that the investigation is not completely presented.

c) **Presentation of untrue data**: manufacturing and handling of presented information that does not arise from real data derived from research.

d) **Research segmentation**: fragmentation of a study in different parts with the intention of generating more than one product with the same work for publication, even in different journals, without recognizing original source.

e) **Alteration of author and coauthors**: Exclusion of members participating in the investigation or inclusion of members without a direct role. Also, any alteration of author–coauthors, must be justified and will not be considered after has been closed edition process.

f) **Alteration of arbitration process**: any attempt that affects the arbitration process (double blind peer-review). Communication between an arbitrator and authors of manuscript, is strictly prohibited.

Review process and arbitration

The authors will be guided through four phases including a preliminary review, arbitration process (peer–review, double blind by external reviewers), final edition and assembly and correction of style and redaction. All the content will be sent to an objective reviewing process by experts in knowledge field, who following the guidelines of the Evaluation Format will communicate the results obtained, allowing the Editor–Chief to know the recommendations made and the respective verdict. In addition, the review process is strictly

confidential, and the reviewers should not have interest conflict.

The revision of the manuscripts will allow to evaluate technical quality based on originality and presence of significant advances in the field of engineering and related sciences, considering the relevance of content, methodological approach and findings obtained and references to previous contributions. Taking as a premise organization of the structure of manuscript and compliance with presentation rules.

Based on review process results, is proposed to the Editor–Chief:

- Publication, without changes.
- Publication, after minor changes, the authors are committed to make the respective adjustments according to the evaluation.
- Publication, after major changes, the authors are committed to make the adjustments and modifications required according to the evaluation results, subject to a new revision.
- Publication of a short version of the manuscript as a emphTech Note, in which case the authors will be notified and will execute the modifications that may take place.
- Publication in another journal, in which case the recommendation to the authors will be made.
- Rejection of the manuscript for publication, in which case new versions will not be received.

Once the review is completed, the manuscript will be elevated to the editing process, where with the intention of ensuring the quality of the publication, may be requested condensation, deletion or incorporation of tables, figures, and equations, considering that the editorial committee could make relevant modifications without affecting the content, as well as would decide about publication if the authors do not respond satisfactorily to the comments made. The edited manuscript will be submitted to the authors for approval.

About the responsibility of authors

Authors who submit their manuscripts for publication in Revista Ingeniería UC, are in knowledge that them will be subjected to a double-blind peer review and arbitration process, and are obliged to:

- Sign the "*Compromise Letter*", stating that the content of manuscript sent to the journal is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated or redundant, it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by another means of diffusion, and finally that the data presented are original and true. Furthermore, the author and coauthors yield patrimonial rights to the journal, but maintain their rights as intellectual authors.
- Previous submits of the manuscript to other journals should be avoided or recognized, and it is necessary to present a communication from the other journal where the arbitration process are left without effect and the motivations considered.
- Should be carefully documented and cited as references, all materials/data used from other research, indicating when they are taken verbatim. Duplication of previous works is not allowed.
- The authors must clearly specify the information related to sources of financing for the development of research.
- Authors should respond timely all communications of Editorial Committee.
- When an error is detected, the author is obliged to retract and make the appropriate corrections.
- Respect to the identification of authors, should be indicated the name of author and coauthors, that have significantly contributed on the research and have been involved in its development, avoiding to include persons who

are not linked to it. The authors and coauthors must be members of a higher education institution or a recognized research structure, providing detailed information related to their 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.

Plagiarism Check

Revista Ingeniería UC uses for plagiarism control the detailed review of the report generated through a combination of available tools, specifically plag.es and Plagiarism Checker by Quetext, additionally through Google Advanced Search with verification of tables, equations, and figures.

Digital preservation

Revista Ingeniería UC uses to digital preservation of its articles, saving zip file with LaTeXformat, also via Marcalyc 2.0 makes marked file generating XML JATS file. Also, includes PKP Preservation Network Plugin.

License Creative Commons

License de Creative Commons Attribution – No Commercial – No derivatives. 4.0 International

Normas para la presentación de artículos

Generales

Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias afines.

Tipos de trabajos

a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.

b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.

c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.

d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.

e Cartas al editor.

f Artículos de tendencia tecnológica, estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo de alta utilidad en el campo industrial.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor está comprometido formalmente con que el trabajo consignado es original e inédito, de igual manera manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y acepta que sea sometido al proceso de arbitraje.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato LaTeX 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 LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras pueden ser en escalas de grises claros o a color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante "negritas".

Toda tabla y/o figura deben ser numerada en arábigo (1, 2, . . .), citada y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: "en la Figura 3", "en la Tabla 2", por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5 cm.

No es estilo de la revista frases como: "en la Figura siguiente" o en la "Tabla anterior"

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada.

2. Introducción.
3. Metodología o Desarrollo de la investigación.
4. Análisis y discusión de resultados.
5. Conclusiones.
6. Referencias.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) y cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Engelbrecht [11], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [11], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en 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 debe incluir por cada referencia la información bibliográfica (DOI, URL, o captura de pantalla) que permita su verificación.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.
- Capítulos de libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Inicial del nombre y Apellido).
- "Título".
- *Nombre de la revista*,
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

[1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities," *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, lugar de publicación : editorial, año de publicación.
Por ejemplo:

[2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

En caso de colección editada: Autor(es), "Título", en *título*, Editor(es), año, Eds., editorial, año de publicación, volumen, capítulo, número de páginas.
Por ejemplo:

[3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, "The Semantic Web – ISWC 2018," in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

[4] D. Nilesh and M. Nagle, "The new cryptography algorithm with high throughput," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas. Adicionalmente, el uso de coma (,) como separador decimal

Notas Finales

Los artículos serán sometidos al proceso de arbitraje, doble ciego por pares por arbitros externos, previo a su publicación. La Revista Ingeniería UC como órgano de difusión y divulgación de las actividades científicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo siempre se ha pronunciado por un Acceso Abierto No comercial (AANC), siendo una institución sin fines de lucro.

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will considerer for publication original and unpublished contributions in engineering, in particular areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

Type of Manuscripts:

a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.

b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.

c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).

d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.

e Letter to Editor.

f Technological trend articles, medium and long-term R & D + i prospective studies of high utility in the industrial field.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the author is formally committed to the consigned paper is original and unpublished, he manifest his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

Article style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using LaTeX or in Microsoft WORD.

The Microsoft WORD works must employ font of Times family, to be stored in compact disk (CD) or send electronically by email to revistaing@uc.edu.ve.

The works in LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in png, eps or pdf.

The figures can be in gray scale, or color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a apart file called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of "bold type". Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, . . .) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: "In Figure 3", "in Table 2", for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5 cm.

The writing sequence for the articles shall be as following:

1. Title page.
2. Introduction.
3. Methodology or Research development.
4. Analysis and Discussion of results.
5. Conclusions.
6. References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).

- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200 words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.
- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Engelbrecht [11], or simply [11] with no author name.

For LaTeX work will use bibliography style "IEEEtran".

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), "full title", *journal*, volume, number, pages and year of publication. For each reference, bibliographic information is required to checking (DOI, URL, or screenshot). For example:

[1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities," *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, place: publisher and year of publication should be included. For example:

[2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), "title," in: *booktitle*, Editor(s) (in caps and lower case), publisher, year, volume, chapter and pages. For example:

[3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, "The Semantic Web – ISWC 2018," in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

[4] D. Nilesh and M. Nagle, "The new cryptography algorithm with high throughput," in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations). Aditionaly, use comma(,) as decimal separator.

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process by external reviewers before they can be published. Revista Ingeniería UC as an organ of diffusion and divulgation of scientific activities of Engineering Faculty at Carabobo University, has always been pronounced for Open Access Non-Commercial policy, being a non-profit institution.

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista Ingeniería UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantienen sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director, Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and coauthors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indizada en:

Universidad de Carabobo
Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri

Decano

Profª. Carmen Guédez
Directora Esc. Ing. Industrial

Profª. Ledy Guerra
Directora Esc. Ing. Eléctrica

Profª. Vanessa Hurtado
Directora Esc. Ing. Mecánica

Prof^{a}. Ixmit López
Directora Esc. Ing. Química

Prof. Ángel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción Intelectual

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof. Eduardo Vargas
Director del Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado

Profª. Cristina Cordero Peraza
Asistente al Decano

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Profª. María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curricular

Profª. Neyda Severian
Directora Estudios Básicos

Profª. Lin Hurtado
Directora de Tecnologías de la Información y Comunicación

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Profª. Lissette Jiménez
Directora de Postgrado

Prof. Luis E. Di Stefano
Director de Administración

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones Químicas

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de Imágenes

Profª. Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Donato Magarelli
Director de Biblioteca

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR–Matriz de información para el análisis de revistas; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ Directory of Open Access Journals

Se publica cada cuatro meses Abril, Agosto, Diciembre. Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula–Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo–e: revista.ing@uc.edu.ve

Correo–e: revistaing@gmail.com

Página Web: http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/; https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707/

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832, Online ISSN: 2610-8240
Enero–Abril 2023, Volumen 30
Número 1

Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;
Actualidad Iberoameticana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México); Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters;
MIAR–Matriz de información para el análsis 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