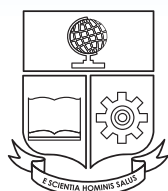
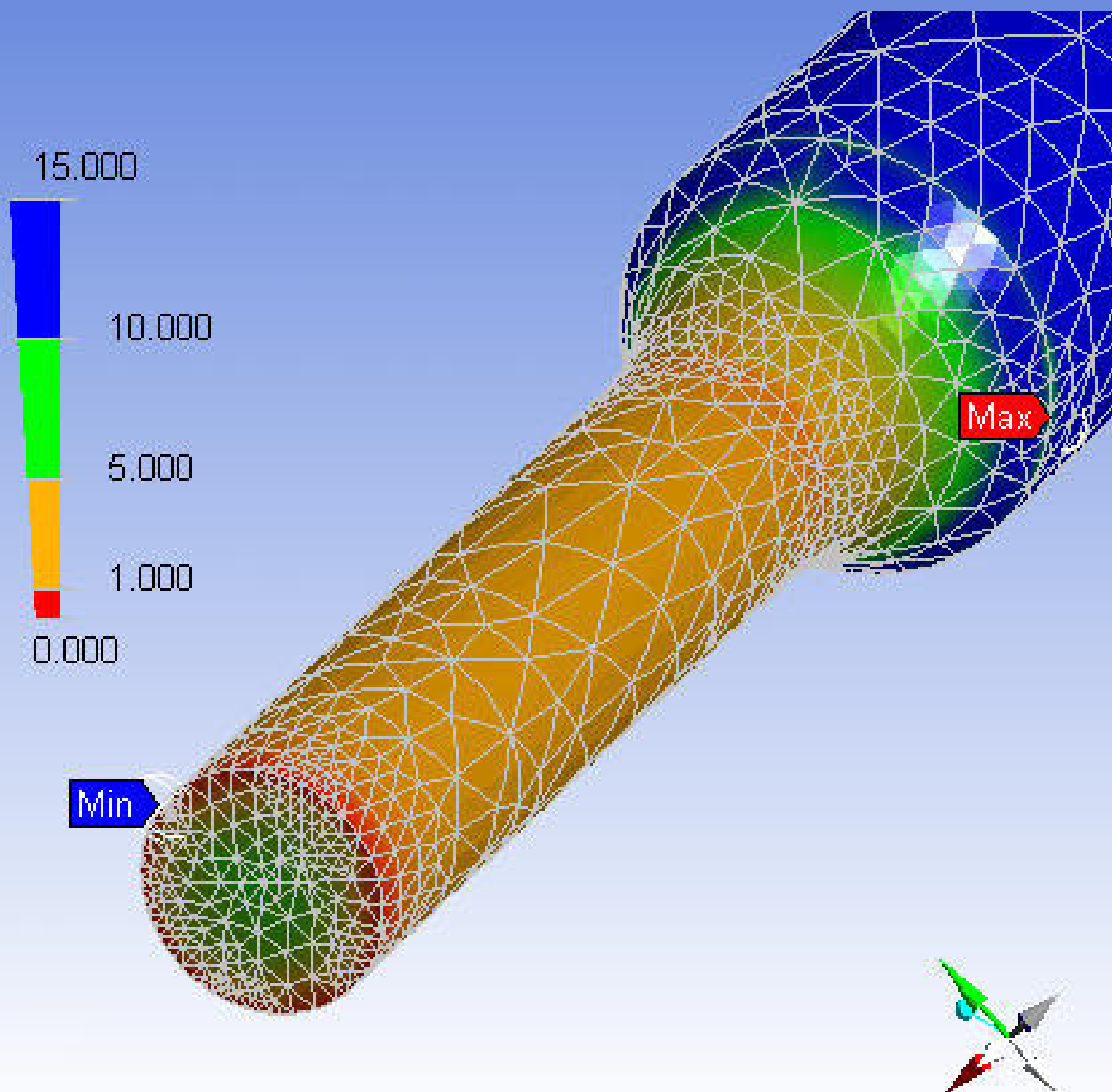




REVISTA POLITÉCNICA



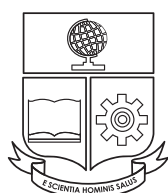
ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 49, No. 1, Febrero - Abril 2022



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 49, No. 1, Febrero - Abril 2022

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITORIA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

Co-EDITOR

Benjamin Bernard, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Hernán Álvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

Ph.D. Majid Khorami (C)
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers
University of Technology, Suecia

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Gabriel Salazar
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

Ph.D. Wilfrido A. Moreno
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Eduardo F. Camacho
Universidad de Sevilla, España

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR) e ICI Journals Master List 2020.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

Ing. Katherine Aro
katherine.aro@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Editorial

“E Scientia Hominis Salus”

“El bienestar del hombre proviene de la ciencia” es la frase que se lee, en latín, en los emblemas de la Escuela Politécnica Nacional. Por definición, *la ciencia es una disciplina que se encarga de estudiar e investigar con rigor los fenómenos sociales, naturales y artificiales a través de la observación, experimentación y medición*. René Descartes, uno de los filósofos más destacados en contribuir a la ciencia, creó el método cartesiano en el que señaló que *“solo se puede decir que existe aquello que pueda ser probado”*.

Partiendo de esta premisa, el rol de la comunidad científica es clave para explicar a la sociedad el progreso de la ciencia y la tecnología. Aunque no es la única forma de divulgación, un artículo científico da cuenta del proceso que sigue una investigación hasta alcanzar su publicación, además, permite a sus autores integrar redes de investigación. Es decir, que la publicación de un artículo de investigación es la consolidación de una investigación rigurosa y el proceso editorial que cumple con el arbitraje de los revisores. De esta manera, los autores contribuyen con sus hallazgos al progreso de la sociedad.

Hoy en día, el bienestar de una sociedad en constante cambio, depende de la democratización del conocimiento. Es responsabilidad de los investigadores poner a disposición de la sociedad los resultados de sus investigaciones, y así promover la integración del conocimiento. Por otro lado, el compromiso de la sociedad con la ciencia, incluyendo la divulgación científica, es esencial para responder a las necesidades actuales y a los desafíos mundiales, en donde los gobiernos deben basar sus políticas en información científica de calidad.

Los desafíos actuales son multidisciplinarios. La ciencia, la tecnología y la innovación deben conducirnos hacia un desarrollo más equitativo y sostenible... hacia el bienestar y progreso de la humanidad. Es por esto que, este nuevo Número de la Revista Politécnica ha seleccionado para la comunidad científica seis artículos de investigación que aportan a las áreas de Ingeniería Mecánica, Química, Civil, Petróleos, y Geología, los cuales buscan dar respuestas a problemáticas concretas de la sociedad.

El Comité Editorial de la Revista reitera el agradecimiento a la confianza de la comunidad científica. Estamos comprometidos como equipo para continuar elevando los estándares de exigencia y calidad, con el objetivo de impactar en contextos internacionales.

Editorial

“E Scientia Hominis Salus”

"The well-being of man comes from science" is the phrase that can be read, in Latin, on the emblems of Escuela Politécnica Nacional. By definition, *science is a discipline that is responsible for rigorously study and research social, natural and artificial phenomena through observation, experimentation and measurement*. René Descartes, one of the most outstanding philosophers who contributed to science, created the Cartesian method in which he pointed out that *“only what can be proved can exist”*.

Based on this premise, the scientific community has a key role to explain the progress of science and technology to the society. Although it is not the only form of dissemination, a scientific article displays the process that a research follows until it is published, and also allows the authors to integrate research networks. It means that, the publication of a research article is the consolidation of a rigorous research and the editorial process that fulfill the peer review. In this way, the authors contribute with their findings to the progress of the society.

Nowadays, the well-being of a constantly changing society depends on the democratization of knowledge. It is responsibility of researchers to make the results of their research available to society, and thus promote the integration of knowledge. On the other hand, the commitment of society to science, including the scientific dissemination, is essential to respond to current needs and global challenges, where governments must base their policies on quality scientific information.

Today's challenges are multidisciplinary. Science, technology and innovation must lead us towards a more equitable and sustainable development...towards the well-being and progress of humanity. That is why, this new Number of Revista Politécnica has selected for the scientific community six research articles that contribute to the areas of Mechanical, Chemistry, Civil, Oil, and Geology Engineering, which seek to provide answers to specific problems of society.

The Editorial Committee of the Journal reiterates its gratitude for the trust from the scientific community. We are committed as a team to continue raising the standards of exigency and quality, with the aim of making an impact in international contexts.

Contenido
Vol. 49, No. 1
Febrero – Abril 2022

7

Tlapanco Rios Ernesto Isaac; Castaño Urrego Carlos Andrés

**Gestión de la Madurez Tecnológica Nivel 1 (TRL 1); Estrategia de Gestión de la
Innovación de Producto en Procesos de Diseño Mecánico**

*Management of Technology Readiness Level 1 (TRL 1); Product Innovation Management
Strategy in Mechanical Design Processes*

19

Pilatasig Luis; Bustillos Jorge; Jácome Fabián; Mariño David

**Evaluación de la Actividad de los Movimientos en Masa de Cachi Alto-Pujilí, Ecuador
Mediante Monitoreo Instrumental de Bajo Costo**

*Evaluation of the Activity of the Mass Movements of Cachi Alto-Pujilí, Ecuador through Low-
Cost Instrument Monitoring*

31

Gómez Giraldo Simón; González Jiménez David; Álvarez Hernán

Modelo de Base Fenomenológica de un Reformador de Etanol con Vapor de Agua

Phenomenological Based Model of Ethanol Reforming Using Steam

43

Toapaxi-Alvarez Jorge; Silva-Bastidas Roberto; Torres-Jacobowitz Cristina

Modelación Numérica Tridimensional del Medidor de Caudal Palmer-Bowlus Aplicando el Programa FLOW-3D

Three-Dimensional Numerical Modeling of the Palmer-Bowlus Measuring Flume Applying the FLOW-3D Software

53

Mayorga-Mayorga Henry Santiago; Reyes-Bueno Fabián

Análisis de Derrames de Petróleo en el Campo Ancón Mediante Sistemas de Información Geográfica

Analysis of Oil Spills in the Ancon Field Using Geographic Information Systems

61

Ruilova Mayra; Izurieta Álvaro

Migración de Finos en el Reservorio Hollín: Diagnóstico, Evaluación y Prácticas de Estimulación desde el Laboratorio hasta la Implementación en Campo

Fines Migration in the Hollín Sandstone: Diagnosis, Evaluation and Stimulation Practices from the Laboratory to Field Implementation

Gestión de la Madurez Tecnológica Nivel 1 (TRL 1); Estrategia de Gestión de la Innovación de Producto en Procesos de Diseño Mecánico

Tlapanco Rios, Ernesto Isaac ^{1,*} ; Castaño Urrego, Carlos Andrés ² 

¹Departamento de Estudios Multidisciplinarios Sede Yuriria, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México

²Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Mecánica, Bogotá, Colombia

Resumen: Desde el punto de vista de la gestión tecnológica, la formulación de estrategias es la actividad clave para un líder de proyecto además de proponer estrategias evaluables, validadas y repetibles. El líder del proyecto además, debe justificar sus estrategias con respecto a los sistemas de innovación como puede ser el uso de los niveles de maduración de la tecnología (TRL) para que los departamentos de ingeniería, financiero y mercadotecnia gestionen los recursos para cumplir con las actividades solicitadas. Esta investigación muestra evidencia del tipo de actividades estratégicas que genera un departamento de ingeniería para la innovación de producto, específicamente en el diseño y estándares de madurez tecnológica. Parte de visualizar el cumplimiento de una especificación TRL 1, seguido de demostrar por medios de análisis de ingeniería mecánica el cómo se puede estandarizar eficientemente un proceso analítico de corte de material con métodos de elemento finito y la ayuda del CAE para convertirlo en un proceso que permita certidumbre en procesos no comunes ni considerados en el diseño mecánico, el resultado puede resultar innovador para la enseñanza de la ingeniería mecánica e incluso para la manufactura del troquelado si se cuentan con las herramientas de cómputo o alianzas con centros de investigación y desarrollo.

Palabras clave: Gestión, Innovación, Ingeniería, Tecnología, CAE.

Management of Technology Readiness Level 1 (TRL 1); Product Innovation Management Strategy in Mechanical Design Processes

Abstract: From the point of view of technological management, the strategy is the key for a project leader in addition to evaluable validated and repeatable strategies. The project leader must also justify its strategies regarding innovation systems, such as the use of Technology Readiness Level (TRL) for the engineering, financial and marketing departments. This research gives evidence of the strategic activities generated by the engineering department focused on product innovation, specifically in the design process and technological maturity. This research shows evidence of the type of strategic activities by an engineering department for product innovation, specifically in the design and technological standards. It begins focusing on compliance TRL 1 specification, proving by mechanical engineering analysis how to efficiently standardize a die cutting with finite element methods (CAE) developing a process that allows certainty in die cutting that is not common or considered in mechanical design, the result can be innovative for the teaching of mechanical engineering and even for the manufacture of die cutting if there are computer tools or alliances with research and development centers.

Keywords: Management, Innovation, Engineering, Technology, CAE.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de la tecnología en la sociedad es el resultado de la articulación de los agentes empresariales vinculados con agentes académicos y gubernamentales, es decir, es un mecanismo que articula a los sistemas de innovación (Hidalgo, 2006).

El agente empresarial que lidera la gestión tecnológica, lo hace a través de modelos de negocio tecnológico y estrategias comparativas, para desarrollar nuevos productos, es decir, los modelos de negocio tecnológico aplican una estrategia de mejora tecnológica para el lanzamiento de nuevos productos, creando mercado o incrementando su participación dentro del mercado en que se encuentran.

*ei.tlapanco@ugto.mx
Recibido: 19/11/2019
Aceptado: 04/01/2022
Publicado: 01/02/2022
10.33333/rp.vol49n1.01
CC 4.0

Dentro de la estrategia tecnológica, una de los enfoques más importantes del valor de las invenciones de un modelo de negocio tecnológico, es el registro de la propiedad industrial, específicamente patentes y modelos de utilidad. Que permite mantener la participación en el mercado mientras la invención sea comercializada (García y Münch, 1992).

Otro agente de la transferencia tecnológica es la academia, la cual procura avalar una innovación por medio del desarrollo metódico del producto, para lo cual normaliza los niveles de madurez tecnológica (Technology Readiness Level -TRL-) concepto que nace en la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y que México ha adoptado a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), el instituto utiliza el sistema de TRL para ubicar los proyectos que recibe en las convocatorias de financiamiento (CONACyT, 2019), es importante destacar que el CONACyT ha tomado como referencia la interpretación del TRL del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (Aplicaciones de la Teoría de Juegos a la Economía Industrial, 2014).

Para fomentar el desarrollo tecnológico, el CONACyT agrupa los niveles del TRL en seis categorías, los TRL 1 y 2 forman la categoría de desarrollo de la invención, los TRL 3 y 4 forman la categoría de validación de concepto, el TRL 5 forma parte de la categoría de desarrollo de prototipo, los TRL 6 y 7 forman la categoría de producción piloto y demostración, el TRL 8 forma la categoría de introducción al mercado y el TRL 9 forma la categoría de expansión de mercado. Las seis categorías se muestran en la Tabla 2.

El modelo del CONACyT ha derivado la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012, Tabla 2, identifica cada nivel de TRL por medio de una lista de verificación con preguntas dicotómicas con respuestas de “sí” o “no”, lo que permite que la herramienta sea eficiente.

La categoría de desarrollo de la invención que incluye los niveles TRL 1 y 2, Figura 1, permite hacer una planeación estratégica en tres actividades principales:

- Innovación organizacional; induce a que el líder del proyecto organice un equipo de trabajo para el logro de los objetivos.
- Innovación de producto y transferencia de tecnología; define actividades claras como son;
 - a) investigación en publicaciones científicas para el desarrollo de ingeniería del producto o desarrollo de investigación básica,
 - b) búsqueda de patentes similares, lo que permite evaluar si es rentable la compra o renta de una patente o desarrollar la invención con fines de proteger la actividad industrial,
 - c) investigación del proceso de manufactura de la posible invención o en su caso la adaptación de tecnología existente.

- Innovación de mercadotecnia, define actividades para detectar si se adquiere tecnología existente y detectar posibles compradores de la invención tecnológica.

Nivel de Madurez de Tecnológica (TRL)	Elementos clave	ID	Parámetros esperados al final de la etapa. Si no ha cumplido con los siguientes aspectos, se encuentra en un nivel inferior del TRL.	Conteste sí o no
Desarrollo de la invención	1 Investigación básica. Principios básicos observados y reportados Artículos científicos publicados sobre los principios de la nueva tecnología.	1	¿Finalizó con la investigación básica de su idea?	
		2	¿Identificó principios de investigación básica que pudieran trasladarse en principios nuevos que puedan ser utilizados en nuevas tecnologías?	
	2 Investigación de Laboratorio. Concepto tecnológico y/o aplicación tecnológica formulada. Investigación aplicada. Publicaciones o referencias que subrayan las aplicaciones de la nueva tecnología. Inicio de la invención.	1	¿Realizó un análisis de los artículos científicos, modelos o teorías científicas que respaldan la aplicación de la idea en algún área tecnológica?	
		2	¿Realizó estudios de búsqueda y análisis de patentes a nivel nacional e internacional, y los resultados indicaron que no existe un desarrollo igual a su idea? (benck mark tecnológico)	
		3	¿Ha explorado principios básicos de manufacturabilidad?	
		4	¿Ha explorado posibles usuarios de la invención?	
		5	¿Cuenta con un grupo de investigación que pueda facilitar la evaluación inicial de factibilidad de la tecnología?	
		6	¿Tiene contemplado un plan de licenciamiento de tecnología a terceros?	

Figura 1. Categoría de desarrollo de la invención (TRL 1 y 2) de la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012
Fuente: CONACyT (2019)

Esta investigación se ha preparado con el fin de mostrar una memoria técnica útil para la estrategia de innovación de producto y transferencia de tecnología, es un desarrollo de ingeniería del producto, aplicado en procesos de diseño mecánico, del cual se obtuvo una metodología para el diseño de troqueles de corte y que redujo costos en un 60%, eliminando fases de pruebas para geometrías complejas de corte por medio de la optimización del diseño de punzones y matrices.

La metodología de diseño utilizada en esta estrategia de innovación de producto es el análisis de ingeniería por computadora (del inglés *Computer Aided Engineering*, CAE, en español la traducción es Ingeniería Asistida por Computadora).

2. ESTRATEGIA DE INNOVACIÓN DE PRODUCTO EN PROCESOS DE DISEÑO MECÁNICO

En la manufactura de procesos metalmecánicos de corte es común que una de las principales actividades sea el cambio de punzones o matrices, en ocasiones se le llama mantenimiento preventivo, sin embargo, no se permite trabajar a los herramientas hasta su máximo rendimiento debido a que se sobreexplota el mantenimiento preventivo y se hacen cambios antes de que sucedan las fallas dejando de explotar la vida útil de un herramental.

Por otra parte, en el caso de punzones y matrices se realiza un cambio preventivo para evitar la falla, descuidando que, una de las razones más importantes que previene la falla es el que un punzón y una matriz, se instalan sin comprobar su eficiencia

contra el material que se troquela, es decir se toman decisiones sugeridas por los proveedores de herramientas a través de catálogos de productos sin comprobar la eficiencia de los productos por algún método experimental o de simulación o sin un análisis de falla.

El objetivo del caso que se presenta fue desarrollar un método de análisis CAE que complemente los análisis tradicionales de diseño e ingeniería del proceso de corte de una lámina de metal por medio de un punzón y una matriz, con el fin de comprobar que se puede utilizar confiablemente para la toma de decisiones de mantenimiento e incluso como propuesta de análisis CAE para diseño de punzones y matrices no convencionales.

La metodología es ajustar un método CAE por medio de otro método de ingeniería como es el análisis y diseño tradicionales, así se asegura que el método CAE sea confiable.

La geometría que se analiza en este estudio es convencional para los procesos de diseño en ingeniería, ya que geometrías complicadas requieren de una investigación que encuentre el modelo matemático idóneo para cada geometría.

La ventaja de ajustar un método CAE es que puede sustituir en ocasiones a la investigación de geometrías complicadas.

Nota: En caso de que el lector esté interesado en seguir la metodología propuesta, debe considerar que la metodología de este artículo solo es una sugerencia con un grado de confiabilidad que permite la toma de decisiones en el diseño.

En esta investigación, se considera el estado lineal elástico de los materiales y no se consideran cambios de dureza a lo largo del material o imperfecciones, tampoco cambios de composición química que puede afectar abrasivamente al punzón o a la matriz, tampoco considera el uso de una prensa con pocas variaciones de carga y linealidad entre otros eventos que suceden en las áreas de manufactura.

Las propiedades de los materiales y las condiciones de frontera que se utilizan en este estudio son un material para laminar un acero AISI 1010, de naturaleza dúctil, el material de punzón y la matriz es un acero D2, templado con dureza de 58 HRC, de naturaleza frágil. Los valores de resistencia se encuentran declarados en Teicholz (1985, pág. 859) y Uddeholm (2003, pág. 3). Propiedades del material AISI 1010; módulo de elasticidad de 200,000 (MPa), módulo de Poisson 0.3, densidad 7.85×10^{-6} (kg/mm³), coeficiente de expansión térmica 1.2×10^{-5} (1/°C), esfuerzo de fluencia a la tensión 300 (MPa), esfuerzo último a la tensión 370 (MPa), esfuerzo de fluencia a la compresión 300 (MPa), esfuerzo último a la compresión 370 (MPa). Propiedades del material D2; módulo de elasticidad 200,000 (MPa), módulo de Poisson 0.3, densidad 7.85×10^{-6} (kg/mm³), coeficiente de expansión térmica 1.2×10^{-5} 1/°C, esfuerzo de fluencia a la tensión 2,200 (MPa), esfuerzo último a la tensión 2,300 (MPa), esfuerzo de fluencia a la compresión 2,200 (MPa), esfuerzo último a la compresión 2,300 (MPa).

El por qué utilizar un modelado CAD-CAE lo explica de una forma razonable, Eric Teicholz en su libro CAD CAM Handbook (1985). “La simulación. Muchos de los programas actuales tienen la ventaja de crear prototipos virtuales evitando así la fabricación de prototipos físicos que sirven para presentación del producto y para ciertos análisis estructurales, la mayoría de las veces cuando se presenta un prototipo físico, este ya es obsoleto y en lugar de convertirse en una herramienta confiable de desarrollo, es una pérdida de tiempo y dinero que muchas veces no justifica los resultados encontrados y por lo tanto no es un factor de mejora, en estos casos, un modelo virtual cumple con el 90% de las ventajas que un prototipo físico proporciona, además de incluir la ventaja de que puede desprender la misma información que un prototipo sin la inversión económica y tiempo ni hacerse obsoleto porque se puede actualizar en minutos”.

3. EVALUACIÓN DE ESFUERZOS DE UN PUNZÓN DE CORTE DE METAL EN PROCESOS METALMECÁNICOS DE TROQUELADO

El problema analítico puede resolverse en cuatro pasos, el primer paso es formular el problema de corte de material para obtener el esfuerzo en que se vence el material a cortar, el segundo es formular el problema de compresión que se somete un punzón para conocer el esfuerzo máximo que puede soportar, el tercer paso es formular el problema de fatiga que se encuentra sometido el punzón para conocer el esfuerzo modificado por las cargas repetidas a las que se somete, y cuarto formular el problema de esfuerzos de contacto entre el punzón y el material a cortar.

El objetivo de formular los casos de esfuerzo es para conocer el valor mínimo que el punzón soporta ante el trabajo que realiza al cortar un material. Con el valor obtenido del menor esfuerzo que soporta el punzón, se puede contrastar contra el valor que se obtiene de un cálculo de CAE.

3.1. Primer paso; formular el problema de corte de material para obtener el esfuerzo en que vence el material a cortar

El modelo de corte que se calcula es para un material que es sometido a corte, con un punzón y matriz que entre ambos se coloca el material a cortar, véase Figura 2.

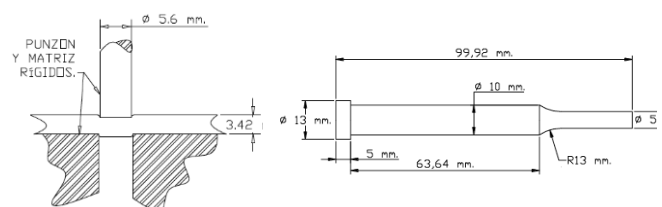


Figura 2. Geometría para evaluación de un proceso de corte
Fuente: Elaboración propia con datos de Boreis, Schmidt & Sidebottom (1993)

La fuerza última de corte se obtiene de la solución matemática de la ecuación 1 (Beer y Johnston, 1993), conociendo los valores de área y esfuerzo cortante último del material AISI 1010 aplicando el círculo de Mohr que soporta el material.

$$F = A\tau_u \quad (1)$$

$$A = L * t = 60.167 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$L = 2 \pi r = 2 (3.1416) (2.8) = 17.592 \text{ (mm)}$$

$$t = 3.42 \text{ (mm)}$$

$$\tau_u = \frac{\sigma_u}{2} 185 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_u = 370 \text{ (MPa)}$$

$$F = 11,065.94 \text{ (N)}$$

3.2. Segundo paso; formular el problema de compresión en un punzón para conocer el esfuerzo máximo que puede soportar en carga axial.

El punzón que se analiza es un punzón convencional de cambio rápido, con un cabezal, un cuerpo de sujeción al porta-punzón, un cambio de sección y un cuerpo de corte como se muestra en la Figura 2, en este tipo de punzones, el punto más débil es el cambio de sección el cual es el que se somete al siguiente análisis de cálculo.

Con la fuerza de carga obtenida por el proceso de corte, $F = 11,065.94 \text{ (N)}$, se puede conocer el esfuerzo en el radio del cambio de sección del punzón, a este esfuerzo se le llama esfuerzo de carga axial, el esfuerzo en el cambio de sección puede observarse en la Tabla 1.

El esfuerzo por carga axial en el cambio de sección como se muestra en la Figura 2, se calcula por medio de la ecuación 2, (Shigley y Mischke, 1995), y si no sobrepasa el esfuerzo normal máximo del material con que se encuentra fabricado el punzón, por medio de la ecuación 3 (Shigley y Mischke, 1995), que es la fórmula del factor de seguridad de la teoría del esfuerzo normal máximo, se asegura que no fallará al momento de someterlo al proceso de corte.

$$\sigma \frac{K}{A} \quad (2)$$

$$F = 11\,065.94 \text{ (N)}$$

$$A = \pi r^2 = 3.1416 (2.8)^2 = 24.63 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$K_t = 1$$

El radio es suficientemente grande para no maximizar el esfuerzo.

$$\sigma_y = 2,200 \text{ (MPa)}$$

Esfuerzo de fluencia para un material D2.

$$\sigma_0 = 449.28 \text{ (MPa)}$$

$$\eta = \frac{\sigma_y}{\sigma_0} \quad (3)$$

Por lo tanto el factor de seguridad es; $\eta = 4.89$.

3.3. Tercer paso; formular el problema de fatiga que se encuentra sometido el punzón para conocer el esfuerzo modificado por las cargas repetidas

Sin embargo, los punzones se someten a esfuerzos de manera repetida a lo que pueden fracturarse por fatiga del material, por lo cual hay que calcular el esfuerzo límite de resistencia de fatiga, ecuación 4 (Shigley y Mischke, 1995), de la cual reduce el factor de seguridad del punzón que se calcula

utilizando la ecuación 5, factor de seguridad de la teoría fatiga de Soderberg.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max}}{2} = 224.64 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_r = \sigma_{\max} = 449.28 \text{ (MPa)}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = 224.64 \text{ (MPa)}$$

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e S'_e \quad (4)$$

$$K_a = A_{s_{ut}}^b = 0.693997542$$

$$a = 1.58 \text{ para un acabado de rectificado}$$

$$b = -0.085 \text{ para } S_{ut} = 2,300 \text{ MPa}$$

$$K_b = 1 \text{ por ser carga axial.}$$

$$K_c = 1 \text{ por ser carga axial y } S_{ut} < 1520 \text{ (MPa)}$$

$$K_d = 1 \text{ por aplicarse la carga a } 20^\circ\text{C.}$$

$$K_e = \frac{1}{K_f}$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$q = 0.98; K_t = 1.5$$

$$S_e = 326,039 \text{ (MPa)}$$

Por último, el factor de seguridad se reduce a 1.27, utilizando la teoría de fatiga de Soderberg. Cabe destacar que para materiales frágiles, comúnmente para predecir la falla se ocupa la teoría del esfuerzo normal máximo; Coulomb-Mohr, fórmula 9 tomada de Shigley y Mischke (1995), la cual funcionaría a la perfección si los punzones y matrices de corte solo estuvieran sometidos a una carga constante, sin embargo, los punzones y matrices de corte son elementos sometidos a; maquinados superficiales, a un factor de tamaño, a un tipo de carga específica, a una temperatura de trabajo, así como otros factores que considera la teoría de fatiga de Soderberg.

Es así que para determinar la falla por fatiga, en esta investigación, se usa la teoría de Soderberg, ecuación 5, (Shigley y Mischke, 1995), es importante destacar que ninguna de las teorías, Soderber y Coulomb-Mohr, se contraponen, Soderberg se encuentra contenida en el polígono de falla por fricción interna (Coulomb-Mohr), Soderberg, es por tanto, un factor conservador que permite al diseñador calcular con mayor seguridad elementos mecánicos sin importar que sean de naturaleza frágil puesto que no solo se espera una falla del material, también se espera una falla por fatiga. El resultado obtenido quiere decir que el punzón solo puede soportar máximo un 27% de resistencia adicional en el material a cortar.

$$\eta = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}}} \quad (5)$$

$$\eta = 1.27$$

Adicionalmente se puede generar una curva de esfuerzos como se muestra en la ecuación 6 (Shigley y Mischke, 1995), con dicha ecuación se puede conocer aproximadamente a los cuantos ciclos fallará el punzón, con los datos obtenidos se calcula que el punzón fallará al 1,000,106 ciclos de carga cuando el esfuerzo de fatiga se ha calculado a 326.039 (MPa).

$$S_f = aNb \quad (6)$$

$$a = \frac{(0.9S_{ut})^2}{S_e} = 114,228 \text{ (MPa)}$$

$$b = \frac{\log\left(\frac{0.9S_{ut}}{S_e}\right)}{3} = -0,2675668$$

$S_e = S'_e = 700 \text{ (MPa)}$; en caso de $S_{ut} > 1,400 \text{ (MPa)}$

Por lo tanto la curva de ciclos contra esfuerzo

$$S_f = 13,142.28 (N^{-0.26756688})$$

Esfuerzo MPa.	Ciclos.
13,142.28	1
7,097.47	10
3,832.98	100
2,070.00	1,000
1,117.90	10,000
603.72	100,000
326.03	1,000,106.30
límite a la fatiga	Ciclos
176.07	10,000,000

3.4. Cuarto paso; formular el problema de esfuerzos de contacto entre el punzón y el material a cortar

Adicionalmente, el contacto entre el punzón y el material a cortar también es crítico, el cálculo del esfuerzo de contacto permite determinar el valor que soporta el filo de corte, el cual es responsable de fracturas en el filo de corte del punzón. La Figura 2 representa el modelo de contacto entre el punzón y el material a cortar, y la ecuación 7 (Shigley y Mischke, 1995), esfuerzo de contacto, permite calcular el esfuerzo de contacto.

$$\sigma_c = \frac{F}{2\pi R^3 \sqrt{R^2 - r^2}} \quad (7)$$

$$F = 11,065.94 \text{ (N)}$$

$$R = 2.8 \text{ (mm)}$$

$$r = 0$$

$$\sigma_c = 224.64 \text{ (MPa)}$$

4. CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE ESFUERZOS DE UN PUNZÓN DE CORTE DE METAL EN PROCESOS METALMECÁNICOS DE TROQUELADO

La evaluación de los esfuerzos por diferentes métodos permite conocer con cuál de ellos la falla es prevenible.

Proceso de corte; indica que se requiere una fuerza de corte de 11,065.94 (N) para la geometría propuesta.

Carga axial del punzón a compresión; indica que el esfuerzo es de 449.28 (MPa) con un factor de seguridad de 4.89 veces, es decir que el punzón no fallará en el cambio de sección a

menos que se aumente la resistencia del material a cortar en un 489%.

Fatiga del punzón por cargas repetidas; indica que el punzón fallará en el cambio sección cerca de un millón de repeticiones y que la resistencia se reduce a 326.03 (MPa) con un factor de seguridad de 1.27, es decir que, si aumenta un 27% la resistencia al corte del material fallará en un corto plazo el punzón.

Esfuerzos de contacto entre superficies; indican que el filo del punzón solo soporta un esfuerzo de corte de 224.64 (MPa).

5. MODELADO EN CAD-CAE

El análisis en computadora se puede realizar en dos pasos, el primero es establecer los criterios básicos del CAE de condiciones de frontera, el segundo paso es establecer los criterios importantes del CAE de tipo de mallado y tipo de elementos seleccionados.

La aplicación utilizada es DesignSpace^{MR}, cabe destacar que este programa está diseñado para trabajar en el rango lineal y estructural de la mecánica de los materiales, por lo que los procesos de doblez y embutido no pueden ser modelados con este software, sin embargo, para cuestiones de aproximaciones resultó muy útil en CAE dado que es una aplicación de fácil aprendizaje y uso, además porque la aproximación que se realiza en este programa es para acercarse un momento antes del comportamiento no lineal del material, en otros programas especializados el diseñador podrá utilizar herramientas no lineales.

El modelo paramétrico en tres dimensiones se puede generar en un programa como IronCAD^{MR}, que simula un ambiente de tercera dimensión en condiciones similares a las reales, de fácil interpretación y visualización, el modelado se realizó bajo las sugerencias de dibujo de Luzzader (1988), Chevalier (2009) y Jensen (1986).

La Figura 3a muestra un modelo en CAD básico, una aproximación con un CAD básico permite aproximaciones, con otros programas de modelado con mayores capacidades de modelado, se podrán controlar escalas para reducir cantidad de elementos, sin embargo para cuestiones de aproximación el modelo que se muestra en esta investigación es bastante cercano a la realidad, en conclusión, este modelo virtual es susceptible a evaluarse por elemento finito. Contiene el punzón de corte, la lámina a cortarse y la matriz que completa la figura de corte.

Modelo de corte de lámina. Para idealizar el modelo de corte de material, se supone que tanto la matriz y el punzón son rígidos y no experimentan deformaciones, para lo cual se coloca la fuerza en la punta del punzón como se muestra en la Figura 3b.

Modelo del punzón. Para idealizar el análisis del punzón, se utiliza el mismo modelo descrito por la Figura 3c y el criterio para la aproximación del ambiente que supone un análisis a compresión teórico.

El colocar una restricción adicional en la punta del punzón del modelo como se muestra en la Figura 3a, sirve para simular que la fuerza completa se aplica sobre el punzón, es notorio que ni el material ni la matriz serán afectados, solo que esta restricción, evita hacer un modelo exclusivo del punzón, también se coloca la fuerza en la base del punzón para simular la compresión axial del sistema.

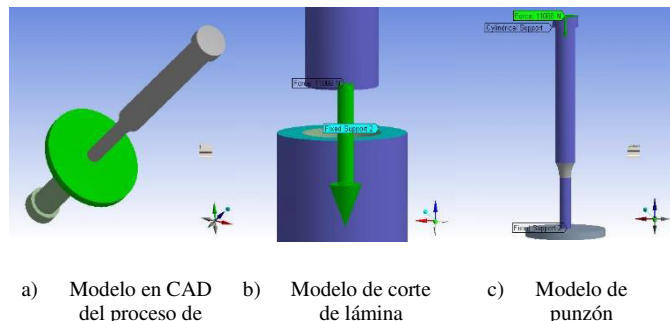


Figura 3. Modelado virtual
Fuente: Elaboración propia

5.1. Primer paso; criterios básicos del CAE de condiciones de frontera

Modelo del contacto. Para suponer el contacto, no se utiliza directamente el modelo del proceso, se utiliza un modelo propuesto para analizar los esfuerzos.

La rigidez del material está acompañada de un soporte fijo en la parte inferior del modelo y un soporte de libertad axial del punzón.

Modelo del proceso. El analizar el modelo del proceso, sirve para encontrar los esfuerzos virtuales para los cuales no existen relaciones teóricas para analizarlos y que son valores aproximados a los verdaderos que suceden en el sistema y diferentes a los teóricos, para lo cual se suponen las condiciones de frontera.

La restricción fija en la base de la matriz indica que el movimiento está completamente restringido en todas direcciones. La restricción cilíndrica con libertad axial en la matriz y el punzón simulan la acción restringida en movimiento del modelo. La Fuerza indica la dirección de la misma y su magnitud en la cara seleccionada. El contacto sin deslizamiento y sin separación de los elementos es importante para simular la sujeción del modelo real que evitan la separación del material con la matriz y el punzón.

5.2. Segundo paso; criterios importantes del CAE de tipo de mallado y tipo de elementos seleccionados

Modelo de corte de lámina. En este modelo, se utiliza el mallado automático, el número de nodos fue 1,179 el número de elementos fue 158 con el elemento tetraedro.

Modelo del punzón. Este modelo también utiliza la selección de la convergencia como alternativa de refinado automático, para evitar conflictos de mallado en la computadora, el número de nodos fue 857, el número de elementos fue 398, con el elemento hexaedro.

Modelo del proceso. Para este modelo se refinan automáticamente los cuerpos, el número total de nodos fue 3,182 el número total de elementos fue 1,130 con el elemento hexaedro solamente en el área refinada, en el área visual de la figura se pueden ver tetrahedros en el exterior.

Modelo del contacto. En este modelo se combinan los mallados manuales y automáticos, debido a que el número de elementos es bajo y no provocan un error en el programa, se refinan los bordes de corte del punzón manualmente y se seleccionan las superficies de la lámina para asegurar la convergencia, el número de nodos fue 2,171 el número de elementos fue 1,251 con el elemento hexaedro.

6. SOLUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Un resultado virtual debe de interpretarse de manera lógica, porque no siempre manifiesta el valor o lugar exacto donde se espera que suceda una falla. Para poder explicar este punto, esta investigación se apoya en las gráficas visuales, estas indican con colores y etiquetas la magnitud donde ocurrirá la posible falla, otro apoyo es la convergencia matemática de error, cuyas gráficas indican la variación de la magnitud conforme el mallado es más fino, a continuación se muestran como interactúan estos dos conceptos entre sí.

En este modelo, no existe convergencia utilizando la teoría del esfuerzo normal máximo, se supone que es porque la mayoría de los fenómenos de la naturaleza tienden a fallar a tensión y no a compresión y el programa DesignSpace^{MR} esta diseñado para analizar solo este rango de los fenómenos utilizando la ecuación 8 (Shigley y Mischke, 1995), esfuerzo normal máximo para realizar sus procesos.

$$\sigma_0 = \sigma_{max} = |\sigma_1| \quad (8)$$

Por otra parte, se utiliza otra teoría aplicable al análisis de materiales frágiles, la teoría de Coulomb-Mohr, ecuación 9 (Shigley y Mischke, 1995), aunque esta teoría sea utilizada para materiales con diferentes valores de esfuerzo a la ruptura en compresión y a tensión, es una aproximación real y aplicable. El esfuerzo de Coulomb-Mohr consiste en alcanzar un cortante máximo preestablecido por diferentes estados de esfuerzo analizados, este esfuerzo se aplica a materiales frágiles Criterio de Coulomb-Mohr; $\sigma_y \neq \sigma_u$.

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} - \frac{\sigma_3}{S_{ut}} = \frac{1}{\eta} \quad (9)$$

En este análisis $\sigma_y = \sigma_u$

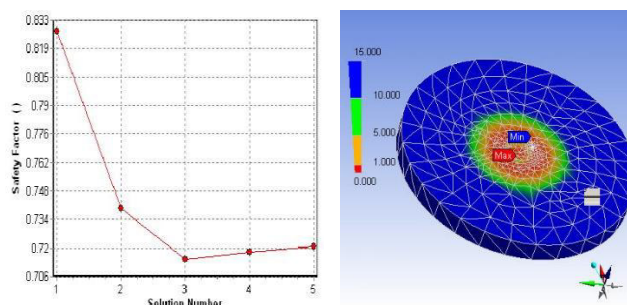
la relación para el factor de seguridad es; $\eta = \frac{\sigma_u}{\sigma_1 - \sigma_3}$

7. CONFIABILIDAD DEL ANÁLISIS VIRTUAL

La interpretación de la iteración, son aproximaciones matemáticas internas del CAE, con la finalidad de que por medio de algún método iterativo se reduzca el error, depende del algoritmo de programación del programa, asegura la convergencia matemática del cálculo y contribuye a la reducción del cálculo.

En esta sección de confiabilidad se agregan la convergencia de los procesos que se realizaron en la etapa de CAE, corte de material, resultados del punzón convencionalmente y el cálculo a fatiga, así como el contacto entre el punzón y el material.

Resultados de corte de material. La convergencia sucede de la 3ª a la 5ª iteración y se espera la superficie del material, véase las Figuras 4a y 4b.

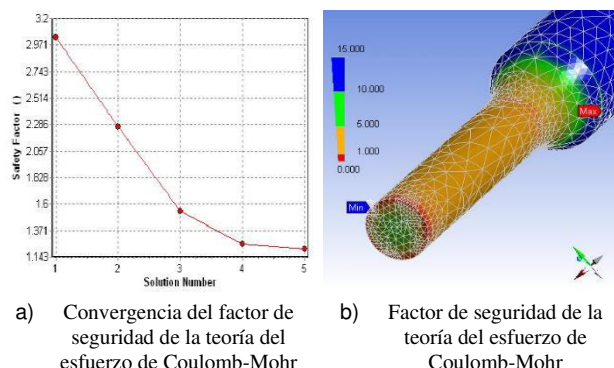


a) Convergencia del factor de seguridad de la teoría del esfuerzo cortante máximo del proceso

b) Factor de seguridad de la teoría del esfuerzo cortante máximo del proceso

Figura 4. Convergencia del factor de seguridad esfuerzo cortante máximo
Fuente: Elaboración propia

Resultados del punzón. La convergencia sucede de la 3ª a la 5ª iteración y se espera en el borde del material, aquí la influencia del esfuerzo de contacto es notoria, ya que se convierte en el esfuerzo crítico para un punzón, véase las Figuras 5a y 5b.



a) Convergencia del factor de seguridad de la teoría del esfuerzo de Coulomb-Mohr

b) Factor de seguridad de la teoría del esfuerzo de Coulomb-Mohr

Figura 5. Convergencia del factor de seguridad de la teoría del esfuerzo de Coulomb-Mohr
Fuente: Elaboración propia

Resultados a fatiga. La convergencia sucede de la 3ª a la 5ª iteración y se espera en el borde del material, aquí la influencia del esfuerzo de contacto también es notoria, ya que por ser el esfuerzo crítico para un punzón, la fatiga se programa para que se analice utilizando el esfuerzo normal en Z, como se realizó en la suposición del esfuerzo de contacto.

Modelo del contacto. La convergencia sucede en la 2ª iteración y se espera la falla en el borde del punzón.

La Tabla 1 muestra los valores de cada análisis convencional, contra los análisis CAE.

El CAE, ante el análisis del esfuerzo cortante máximo, es menor en 3%, es un valor muy útil porque calcula con

confianza 3% por encima de lo que se espera en un análisis convencional.

El CAE ante la teoría de Coulomb-Mohr, es menor en un 11.86%, es un valor muy útil porque calcula con confianza 11.86% por encima de lo que se espera en un análisis convencional.

El CAE ante la teoría de fatiga de Soderberg, es mayor en un 23.80%, es un valor poco confiable porque ofrece un 23.80% porque eleva el valor esperado en un análisis convencional.

El CAE ante el contacto, es mayor en un 26.05%, es un valor poco confiable porque ofrece un 26.05% porque eleva el valor esperado en un análisis convencional.

Tabla 1: Confiabilidad de análisis virtuales contra teóricos en el proceso de corte

Teoría.	Factor de seguridad.			
	Teórico	Virtual.		% de error teórico
		F.S.	% de error de iteración	
Lámina.				
Teoría del esfuerzo cortante máximo	1	0.97	0.34%	-3.00%
Punzón.				
Teoría de Coulomb-Mohr	4.89	4.31	3.60%	-11.86%
Teoría de fatiga de Soderberg	1.26	1.56	6.42%	+23.80%
Contacto.				
Esfuerzo axial	224.64	283.15	3.79%	+26.05%

Fuente: Elaboración propia / cálculo matemático * Todos los modelos convergieron en la 5ª iteración.

Los resultados de la comprobación de los resultados teóricos contra resultados reales utilizando probetas en ensayos destructivos no se reportan en este documento por ser confidenciales, sin embargo, se presentan los resultados convencionales, Tabla 1, para que analistas de ingeniería, estudiantes y profesores utilicen la información de este documento con fines didácticos o consulta, los cuales les pueden ser útiles para generar su propia línea de investigación.

Aunque los resultados de los ensayos destructivos no se muestran en este documento por considerarse confidenciales, se muestra una fotografía, Figura 6, en la que se puede observar claramente el tipo de falla que sucede al someter al trabajo continuo a los punzones y matrices, en dicha fotografía se observa que la falla ocurre en el filo de corte, lo cual es congruente con la Figura 5 generada virtualmente.



Figura 6. Fallas en punzones y Fallas en matrices
Fuente: Elaboración propia

Por último, se recomienda que una vez que se ha dominado el proceso de análisis virtual, como el que muestra este documento, se realicen los ensayos destructivos y no destructivos respectivos, el lector puede consultar algunos estudios de comparación que contrastan la simulación en CAD-CAE contra resultados de ensayos destructivos como el realizado por Castaño-Urrego, Lopez-Perez, Forero-Rubiano y Tlapanco-Rios (2020) llamado “Método de comparación de resultados de modelado CAD-CAE contra probetas de ensayo destructivo” en dicho estudio una empresa de transporte solicitó analizar un problema de ensamble con ayuda virtual, el resultado que se muestra en dicho estudio muestra un error del cálculo virtual CAD-CAE y los ensayos destructivos que varía entre los valores de 1.54% a 2.08%.

Por otra parte el diseñador que esté siguiendo la metodología del TRL, puede estar seguro que los resultados son iterativos, es decir que requerirá de validar sus análisis con pruebas y ensayos desde la etapa TRL 1 hasta TRL 5 como se sugiere en la tabla 5, que se refiere al proceso sugerido para utilizar la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012; es decir el trabajo de modelado no termina con comprobación de resultados teóricos por medio de CAD-CAE, pues deberá seguir paso a paso el desarrollo tecnológico generado previamente para concluir con la innovación esperada.

8. CONCLUSIONES DEL MODELADO CAD-CAE

Estas conclusiones son válidas porque con el uso de estas aproximaciones se logró diseñar elementos de troquelado para la industria que solicitó el análisis, la empresa validó los resultados utilizando los mismos criterios de CAD-CAE en la fabricación de otros punzones y matrices con contornos no convencionales, Figura 7. Los resultados fueron satisfactorios, validados y de alto valor para la empresa.

Cabe destacar que esta investigación es una propuesta y utiliza una estrategia que el diseñador fue alternando con el software que se le proporcionó. Cada diseñador es libre de proponer estrategias diferentes y adecuadas con el uso de diferentes programas que estén a su alcance.

En la actualidad, el proceso de diseño de un troquel puede ser acompañado por el análisis por elemento finito de los elementos que lo componen debido a que el análisis modifica sustancialmente el diseño y que es una herramienta de apoyo para conocer de manera temprana si lo que se está diseñando cumple con las características de ingeniería y en su caso mejorarlo asegurando que el sistema funcionará con factores de seguridad.

En un modelo complejo no existen formulaciones convencionales para el análisis, por lo que es necesario recurrir a una formulación virtual como el CAD-CAE. En la Figura 7 se puede observar un modelo complejo, en la parte inferior o base se encuentra la matriz, la placa rectangular es la lámina y el elemento superior es el punzón.

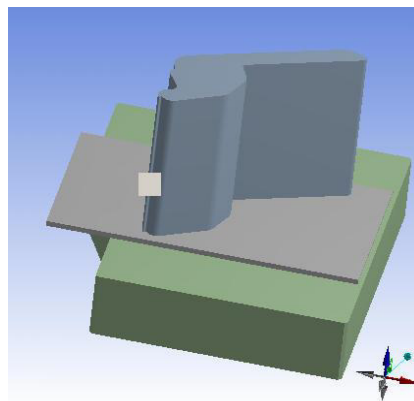


Figura 7. Modelo de configuración compleja
Fuente: Elaboración propia

La Figura 7 puede ser sometida a un análisis CAE, si se utiliza el mismo método planteado en esta investigación, y al menos se tiene que contemplar que:

- El CAE ante el análisis del esfuerzo cortante máximo, estará 3% por debajo de lo que se espera en un análisis convencional.
- El CAE ante la teoría de Coulomb-Mohr, estará 11.86% por debajo de lo que se espera en un análisis convencional.
- El CAE ante la teoría de fatiga de Soderberg, incrementará un 23.80% el valor esperado en un análisis convencional.
- El CAE ante el contacto, incrementará 26.05% el valor esperado en un análisis convencional.

9. CONCLUSIONES

La estrategia de innovación de producto en procesos de diseño mecánico finaliza al responder las preguntas correspondientes al nivel TRL 1 como lo solicita la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012.

Para este caso, las preguntas que se pueden responder son las siguientes: ¿Finalizó con la investigación básica de su idea? La respuesta es una certeza por lo que se puede responder con un sí, y la pregunta ¿Identificó principios de investigación básica que pudieran trasladarse en principios nuevos que puedan ser utilizados en nuevas tecnologías? La respuesta es una certeza por lo que se puede responder con un sí. Estas respuestas son el Inicio del Proceso como se sugiere en la Tabla 3.

Por último, el aplicar metódicamente el modelo nacional de gestión de tecnología (NMX-GT-004-IMNC-2012) es una herramienta para la planeación estratégica de la innovación, además de que permite ubicar las actividades de innovación. El desarrollo de cada uno de los TRL permite generar bases de datos que reducen la incertidumbre tecnológica para otros proyectos tecnológicos. En este caso se difunde por medio de la publicación de esta investigación un TRL 1 que pueda servir de ejemplo en el diseño, pero más importante es el difundir ejemplos de proyectos TRL en todos los niveles, con fines metodológicos y didácticos, que reduzcan la subjetividad del

desarrollo tecnológico, la Tabla 2 es la guía principal para el seguimiento del TRL, y la Tabla 3 es un diagrama de flujo basado en la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012, la cual es una propuesta para la toma de decisiones que conduzca al logro total de los nueve niveles del TRL.

Los conceptos de la tabla 4 que se refieren a la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012, los describe el CONACYT y se transcriben a continuación:

"Technology Readiness Level, TRL: Es una escala de medición usada para evaluar o medir el nivel de madurez de una tecnología particular. Cada proyecto tecnológico es evaluado frente a los parámetros de cada nivel tecnológico y es asignado a una clasificación basada en el progreso del proyecto.

Investigación y Desarrollo Experimental (I+D): Es una actividad de innovación tecnológica que puede ser llevada a cabo en diferentes fases del proceso de innovación, siendo utilizada no sólo como la fuente de ideas creadoras sino también para resolver los problemas que pueden surgir en cualquier fase de dicho proceso hasta su culminación. Comprende la investigación básica, la investigación aplicada y el desarrollo experimental.

La investigación básica consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden principalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de los fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.

La investigación aplicada consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos; sin embargo, está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico.

El desarrollo experimental consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos existentes obtenidos de la investigación y/o la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora sustancial de los ya existentes. Fuente: Manual de Frascati (2002) OCDE, Propuesta de Norma Práctica para Encuestas de Investigación y Desarrollo Experimental.

Innovación: Es la introducción al mercado de un producto (bien o servicio), proceso, método de comercialización o método organizacional nuevo o significativamente mejorado, por parte de una organización. (Manual de Oslo, 2005, OCDE, Tercera edición.) Observe que sus principales características son que es algo nuevo, único y comercializable.

Innovación tecnológica: Innovación que se distingue por una mejora o novedad en las características del desempeño de los productos o servicios, y su aplicabilidad en la práctica dependerá del grado en que dichas características y su grado de novedad sean un factor importante en las ventas de una empresa o industria concerniente. (Manual de Oslo, 2005, OCDE, Tercera edición.)

Desarrollo tecnológico: Desarrollo Tecnológico. Uso sistemático del conocimiento y la investigación dirigidos hacia la producción de materiales, dispositivos, sistemas o métodos incluyendo el diseño, desarrollo, mejora de prototipos, procesos, productos, servicios o modelos organizativos (LCTI).

Propiedad intelectual: Conjunto de derechos de carácter exclusivo que otorga el Estado, por tiempo determinado, a las personas físicas o morales que han realizado creaciones intelectuales abarcando las obras contempladas por la Propiedad Industrial, Derechos de Obtentor y el Derecho de Autor. (NMX-GT-001-IMNC-2007)

Pruebas: Se refiere a todas las actividades que sean requeridas para validar y demostrar la funcionalidad de los componentes así como su aplicación.

Principios básicos: Es aquello que sustenta, respalda y da validez a la idea y traza la línea de investigación.

Validación comercial / Quick Look: Poder identificar-validar, a través del contacto con fuentes primarias directas, las secciones del CANVAS relacionadas con los segmentos de clientes, mercado y propuesta de valor que agrega la oferta tecnológica.

El Quick Look contiene lo siguiente, utilizando como referencia fuentes secundarias como marco referencial, pero principalmente de fuentes primarias (de preferencia al menos 100 entrevistas con actores clave de la industria en cuestión): Descripción de la tecnología, beneficios potenciales, mercados potenciales para la comercialización, interés de los mercados, estado que guarda el desarrollo tecnológico, proceso de protección intelectual, tecnologías que compiten y competidores "análisis de benchmarking", identificación de barreras de entrada al mercado, recomendaciones, medición del nivel potencial de comercialización, realizar entrevistas con expertos de mercado y de transferencia de tecnología y documentación de entrevistas (Internet, presenciales, telefónicas, grupos de enfoque, etc.).

Ambiente operativo real: Pruebas y validaciones con usuarios reales y potenciales."

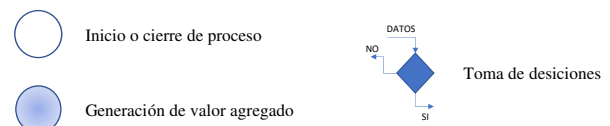
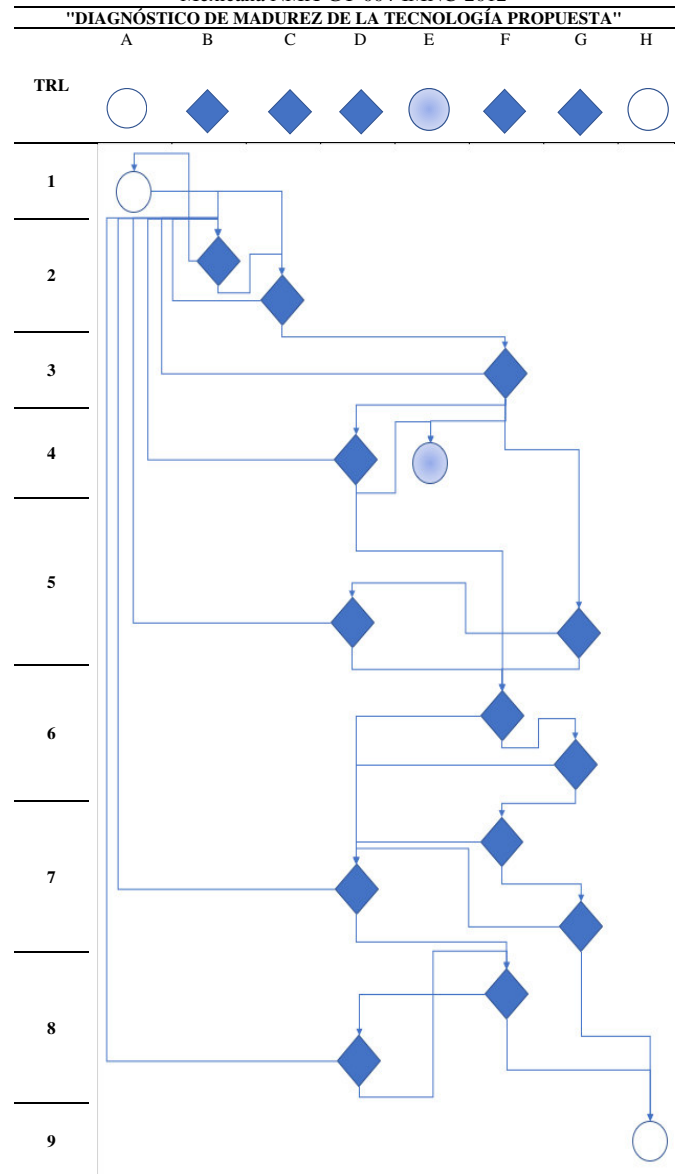
Tabla 2: Niveles TRL, Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012 "DIAGNÓSTICO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA"

Nivel de Madurez de Tecnológica (TRL)	Elementos clave
1	Investigación básica. Principios básicos observados y reportados. Artículos científicos publicados sobre los principios de la nueva tecnología.
	Investigación de Laboratorio. Concepto tecnológico y/o aplicación tecnológica formulada. Investigación aplicada. Publicaciones o referencias que subrayan las aplicaciones de la nueva tecnología. Inicio de la invención.
2	Investigación de Laboratorio. Prueba experimental de concepto Primera evaluación de la factibilidad de un concepto y su tecnología.
	Desarrollo Tecnológico. Validación tecnológica a nivel laboratorio Validación de un prototipo inicial con componentes integrados en laboratorio con baja confiabilidad de comportamiento.
3	Desarrollo Tecnológico. Tecnología validada en laboratorio pero en condiciones de un entorno relevante (condiciones que simulan condiciones existentes en un entorno real). La integración de los componentes empieza a ser de alta confiabilidad.
	Para el caso de plataformas tecnológicas, el ambiente relevante debe considerar condiciones industriales, no de laboratorio experimental académico. Proceso de planeación del negocio
4	Demostración tecnológica. Tecnología demostrada en un ambiente relevante Para el caso de plataformas tecnológicas, el ambiente relevante debe considerar condiciones industriales, no de laboratorio experimental académico.
	Pre-producción de un producto, incluyendo pruebas en un ambiente real.
5	Desarrollo de Producto. Demostración de prototipo a nivel sistema en un ambiente operativo real (sistema real). Producción a baja escala para demostración en ambiente operativo real.
	Desarrollo de Producto. Sistema completo y evaluado. Manufacturabilidad probada y validada para ambiente real.
6	Sistema completo y certificado. Producto o servicio comercializable. Resultados de las pruebas del sistema en su configuración final.
	Producto terminado. Pruebas con éxito en entorno real. Despliegue. Tecnología disponible en el mercado. Aplicación comercial.
7	
8	
9	

Fuente: (CONACYT, 2019)

Algunos otros estudios que se pueden consultar para una mejor comprensión del TRL son los realizados por David Moorhouse (2002) en su artículo "Detailed Definitions and Guidance for Application of Technology Readiness Levels", en el cual describe detalladamente la terminología del TRL de los niveles 1 al 7, rango que el autor consideraba como el rango de desarrollo tecnológico, y la finalidad de que quien consulte el artículo de Moorhouse le sirva de ayuda en la toma de decisiones gerenciales. Otro estudio como el de John Mankins (2009) en su artículo "Technology readiness assessments: A retrospective" nos hace una remembranza histórica de la formación del TRL dentro de la NASA, dentro del Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América y el Congreso de la Unión, el recorrido lo hace a través de los últimos 30 años desde la década de 1970, otro artículo como el de Don Clausing y Maurice Holmes (2010) en su artículo "Technology Readiness" explora el proceso de la innovación, es decir de como utilizar el TRL como parte de un método para que la inversión económica en un proyecto sea altamente confiable y de muy bajo riesgo de inversión en el desarrollo tecnológico.

Por último, se muestra la propuesta de un diagrama de flujo respecto a la Norma Oficial Mexicana analizando la propuesta de la misma norma provenientes de la Tabla 3.

Tabla 3: Propuesta de diagrama de flujo basado en la Norma Oficial Mexicana NMX-GT-004-IMNC-2012

A	Revisión de Investigación Básica
B	Desarrollo científico en CAD-CAE (Investigación Aplicada)
C	I+D en Laboratorio
D	Desarrollo Tecnológico y Pruebas
E	Generar Propiedad Industrial o Intelectual y/o Publicaciones Científicas
F	Ingeniería Industrial y Desarrollo Experimental
G	Prueba en Mercado Validación comercial / Quick Look y Ambiente Operativo Real
H	Lanzamiento o Innovación

Fuente: Elaboración propia con datos de Niebel y Freivalds (2004) y CONACYT (2019)

10. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato y al Tecnológico Nacional de México Instituto Tecnológico de Celaya por los equipos de Profesores de Ingeniería Mecánica, en especial al M. I. Raúl Lesso Arroyo (1965-2019).

REFERENCIAS

- Chevalier, A. (2009). *Dibujo Industrial*. México: Limusa.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (11 de Abril de 2019). CONACyT. Obtenido de Convocatoria 2017-02 "CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética-Institucional Links": <https://www.conacyt.gob.mx/index.php/sni/convocatorias-conacyt/convocatorias-fondos-sectoriales-constituidos/convocatoria-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/convocatorias-cerradas-sener-conacyt-sustentabilidad-energetica/convocatoria-2017-02-conacyt>
- Luzzader, W. J. (1988). *Fundamentos de Dibujo en Ingeniería*. Naucalpan de Juárez: Pretince Hall.
- Beer, F. P., y Johnston, Jr, E. R. (1993). *Mecánica de Materiales*. Santafé de Bogotá: McGraw Hill Interamericana S. A.
- Boresi, A. P., Schmidt, R. J., y Sidebottom, O. M. (1993). *Advanced Mechanics of Materials*. New York: John Wiley & Sons. Inc.
- Castaño-Urrego, C. A., Lopez-Perez, J. R., Forero-Rubiano, R. A., y Tlapanco-Rios, E. I. (2020). Método de comparación de resultados de modelado CAD-CAE contra probetas de ensayo destructivo. *Acta Universitaria* 30. doi: <http://doi.org/10.15174.au.2020.2668>.
- Clausing, D. y Holmes, M. (2010). Technology Readiness. *Research-Technology Management*, Volume 53, Pages 52-59. doi: <https://doi.org/10.1080/08956308.2010.11657640>.
- Garcia Martinez, J. G., y Münch Galindo, L. (1992). *Fundamentos de Administración*. Trillas.
- Guinet, J. (1995). *National Systems for Financing Innovation*. Paris: Organisation For Economic Co-operation and Development.
- Hidalgo, A. (2006). *Mecanismos de transferencia de tecnología y propiedad industrial entre la Universidad, los Organismos Públicos de Investigación y Empresas*. Madrid: EOI ESCUELA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL.
- Industrial Press Inc. (1992). *Machinery's Handbook* Twenty-Fourth Edition. New York: Industrial Press Inc.
- Jensen, M. (1986). *Fundamentos de Dibujo Mecánico*: McGraw Hill.
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2014). *Aplicaciones de la Teoría de Juegos a la Economía Industrial*: Economía Industrial.
- Mankins, J. C. (2009). Technology readiness assessments: A retrospective. *Acta Astronautica*, Vol. 65 (9-10), p. 1216–1223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>.
- Moorhouse, David. (2002). Detailed Definitions and Guidance for Application of Technology Readiness Levels. *Journal of Aircraft*, Volume 39 (1), p. 190-192. doi: <https://doi.org/10.2514/2.2916>.
- Mott, R. L. (1995). *Diseño de elementos de máquinas*. Naucalpan de Juárez: Pretince Hall Hispanoamericana S. A.
- Niebel, B. W., y Freivalds, A. (2004). *Ingeniería Industrial, Métodos, Estándares y Diseño del Trabajo*. México, D. F.: Alfaomega.
- Shigley, J. E., y Mischke, C. R. (1995). *Diseño en Ingeniería Mecánica*: McGraw Hill.
- Society Of Manufacturing Engineers. (1990). *Die Design Handbook*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Teicholz, E. (1985). *CAD CAM Handbook*: McGraw Hill.
- Timoshenko, S. P., y Goddier, J. N. (1987). *Theory of Elasticity*: McGraw Hill.
- Udholm. (2003). *AISI D2 Cold Work Tool Steel: Steels for Cold Work Tooling*

BIOGRAFÍAS



Dr. Ernesto Isaac Tlapanco Rios, desarrolla la línea de investigación de Sistemas de Innovación, Transferencia de Tecnología y Emprendimiento de Base Tecnológica. Tiene en proceso 3 títulos de Propiedad Industrial, 1 publicación indexada, 1 capítulo de libro. Director de 4 tesis. Responsable Técnico en 2 proyectos de investigación. Es Doctor en Ciencias del Desarrollo Regional, Maestro en Gestión Administrativa e Ingeniero Mecánico con especialidad en Diseño. Es Profesor Investigador en la Universidad de Guanajuato. De 1999 a 2009 laboró aplicando la Ingeniería en Procesos, Proyectos y Diseño para el grupo Uniko, Acros-Whirlpool, General Mills y Arbomex.



Carlos Andrés Castaño Urrego, nacido en Bogotá (Colombia) en 1994. Cursó los estudios primarios y secundarios en Colegio Militar Caldas (Colombia), sus estudios de ingeniero mecánico en la universidad Santo Tomás (Colombia). Estudiante de la maestría en ciencias de la Administración de Tecnologías en la universidad de Guanajuato (México) desde el 2020. Ejerció como diseñador en Siberia, Cundinamarca (Colombia). Profesor nivel licenciatura en la universidad de Guanajuato.

Evaluación de la Actividad de los Movimientos en Masa de Cachi Alto-Pujilí, Ecuador Mediante Monitoreo Instrumental de Bajo Costo

Pilatasig, Luis ^{1,*} ; Bustillos, Jorge¹ ; Jácome, Fabián¹ ; Mariño, David¹ 

¹Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Universidad Central del Ecuador, Ciudadela Universitaria, Quito, Ecuador

Resumen: La zona de Cachi Alto está ubicada en la serranía ecuatoriana, formando parte de las estribaciones orientales bajas de la Cordillera Occidental, aproximadamente a 90 Km al suroeste de Quito. El área forma parte de una extensa región donde ocurren procesos geodinámicos externos o movimientos en masa, tanto activos como inactivos de dimensiones variables. El objetivo del estudio es evaluar el estado de la actividad de los movimientos en masa, incluyendo la tendencia o dirección de movimiento de los materiales, datos con los cuales se propone también la tipología de los procesos geodinámicos. Esta investigación presenta los resultados del monitoreo instrumental realizado mediante extensómetros artesanales y estación total, combinado con cartografía de deformaciones superficiales de la corona de un deslizamiento antiguo. Las magnitudes y tendencias de los movimientos varían entre 10 mm y 1302 mm hacia el norte y sur y los resultados del monitoreo establecen desplazamientos en varias direcciones en la componente horizontal, además de asentamientos y levantamientos en la componente vertical en varias zonas ubicadas en la parte superior del deslizamiento antiguo. Con base en los resultados obtenidos, los movimientos en masa son catalogados como reactivados y toda la zona puede interpretarse como inestable. Finalmente, considerando la dinámica existente, se concluye que los procesos geodinámicos dentro del área no tienen relación con deslizamientos clásicos, razón por la cual las deformaciones superficiales posiblemente están relacionadas con procesos de acomodamiento de bloques en una zona afectada por deformación gravitacional profunda en laderas.

Palabras clave: Movimientos en masa, monitoreo, deformación superficial, deformación gravitacional profunda, Cordillera Occidental.

Evaluation of the Activity of the Mass Movements of Cachi Alto-Pujilí, Ecuador through Low-Cost Instrument Monitoring

Abstract: The Cachi Alto zone is located in the Ecuadorian mountain range, as part of the Eastern foothills of the Western Cordillera, approximately 90 Km to the southwest of Quito. The area is part of an extensive region where many external geodynamic processes or mass movements occur, both active and inactive of variable magnitudes. The aim of the study is to assess the state of the activity of mass movements, including the trend or direction of movement of materials, data with which the type of geodynamic processes is also proposed. This research shows the results of instrumental monitoring performed through handmade extensometers and total station theodolite, combined with surface deformation mapping of the crown of the old landslide Cachi Alto. The magnitudes of the displacements and trends vary between 10 mm and 1302 mm to the north and to the south. The monitoring results establish movements in various directions in the horizontal component, as well as settlements and uplifts in the vertical component in various zones located in the upper part of the ancient landslide. Taking into account the obtained results, the mass movements are classified as reactivated and the entire area can be interpreted as unstable. Finally, considering the existing dynamics, it is possible to conclude that geodynamic processes into the area are not related to classical landslides, which is why surface deformations are possibly related to block rearrangement processes in an area affected by deep seated gravitational slope deformation.

Keywords: Mass movements, monitoring, surface deformation, deep seated gravitational deformation, Western Cordillera.

1. INTRODUCCIÓN

La zona de Cachi Alto está ubicada en la serranía ecuatoriana, formando parte de las estribaciones orientales

bajas de la Cordillera Occidental, aproximadamente a 90 km al suroeste de la ciudad de Quito y 10 Km al suroeste de la población de Pujilí. El área forma parte de una extensa región muy susceptible a la ocurrencia de movimientos en

*Ifpilatasig@uce.edu.ec
Recibido: 21/07/2021
Aceptado: 04/01/2022
Publicado: 01/02/2022
10.33333/rp.vol49n1.02
CC 4.0

masa de diversa tipología. Los principales procesos reportados son tipo deslizamientos de variada magnitud. Los estados de actividad de los mismos varían entre activos e inactivos. Los datos cartográficos cualitativos de uno de estos movimientos en masa denominado Cachi Alto, indican que es un deslizamiento antiguo o inactivo (Burga, 2019), a pesar que en la zona sur del escarpe principal ocurren deformaciones superficiales como escarpes y grietas asociadas a movimientos en masa, sin datos cualitativos y cuantitativos sobre la tipología y dinámica de las mismas. Este estudio tiene como alcance establecer las características de las laderas de Cachi Alto-Pujilí, siendo el objetivo principal evaluar el estado y la distribución de la actividad de los movimientos en masa, incluyendo la tendencia o dirección de movimiento de los materiales, datos con los cuales se propone también la tipología de los procesos geodinámicos. El presente trabajo, presenta los resultados del monitoreo mediante extensómetros artesanales y estación total (monitoreo geodésico), incluyendo información de deformaciones superficiales de la zona sur del deslizamiento antiguo, así como del escarpe principal. El análisis de los datos y la comparación de los resultados obtenidos con dos técnicas de monitoreo, incluyendo la información de la deformación superficial reciente, permite conocer la magnitud y tendencia de los movimientos de los sitios donde esta instalados los instrumentos, con lo cual se presenta una hipótesis sobre el origen, la relación con otros procesos geológicos y la tipología de los movimientos en masa.

2. CONTEXTO MORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO

El área de estudio está localizada en las estribaciones orientales bajas de la Cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos ($78^{\circ}44'59.52''\text{W}$ - $0^{\circ}58'22.76''\text{S}$), dentro de una región donde la altitud varía de 3000 a 3500 m.s.n.m. (Figura 1). El relieve es dominado por colinas con pendiente variable, de horizontal a inclinada ($\pm 20^{\circ}$) en las zonas altas y moderadamente inclinada ($\pm 50^{\circ}$) a vertical en los márgenes de los drenajes y en los escarpes de los movimientos en masa. La zona forma parte de la cuenca media a baja del río Patoa. El principal drenaje que atraviesa el área de estudio constituye una quebrada intermitente, cuyo valle es usado para la agricultura y ganadería de subsistencia.

La zona está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas, las cuales están cubiertas por depósitos de naturaleza volcánica (Figura 2). Las rocas volcánicas y volcanoclásticas están incluidas por Burga (2019) en la Unidad Río Cala de edad Cretácico (Boland, et al. 2019) y Grupo Zumbagua (Hughes, et al., 1998), respectivamente. Los depósitos de naturaleza volcánica incluyen una capa de cangahua de hasta ± 20 metros de espesor incluyendo capas centimétricas de lapilli, las cuales en la zona sur están cubiertas por una delgada capa de suelo de hasta ± 1 metro de espesor y en la zona norte por un depósito coluvial antiguo (Burga, 2019) de aproximadamente 10 metros de espesor. Este último está relacionado con el movimiento en masa de Cachi Alto. Todas las secuencias litológicas están

deformadas y tectonizadas, con excepción del depósito coluvial.

La deformación y el tectonismo están relacionados con tres sistemas de fallamiento que atraviesa la región (Figura 2). Un sistema de fallamiento tipo inverso de rumbo N-S buzando al oeste, relacionado con el sistema de fallas Pallatanga-Pujilí-Calacalí (Mc Court, et al., 1997); otro sistema tipo inverso de rumbo NE-SW buzando al SE, posiblemente relacionado con la falla Tambillo (Mc Court, et al., 1997) y un tercer sistema tipo transcurrente de rumbo E-W.

Los movimientos en masa establecidos en la región mediante información sismológica datan de 1962 a partir de dos sismos ocurridos en la zona (Egred, informe inédito no publicado). En 1995 (un año antes de sismo de Pujilí de 1996), otro movimiento en masa complejo denominado Cuturiví de enorme magnitud ($\pm 1,8 \text{ km}^2$) fue reportado al sur y sur este de Cachi Alto (Paladines, et al, informe inédito no publicado). Considerando la clasificación de Cruden y Varnes (1996) y mediante información cartográfica Pilatasig, et al. (2018) y Burga (2019) determinan que en la zona de Cachi Alto ocurren tres deslizamientos, dos de tipo traslacional y un deslizamiento antiguo posiblemente también de tipo traslacional (Figuras 2a y 2b).

Los deslizamientos son de pequeña ($\pm 0,003 \text{ km}^2$), mediana ($\pm 0,017 \text{ km}^2$) y gran magnitud ($\pm 0,12 \text{ km}^2$).

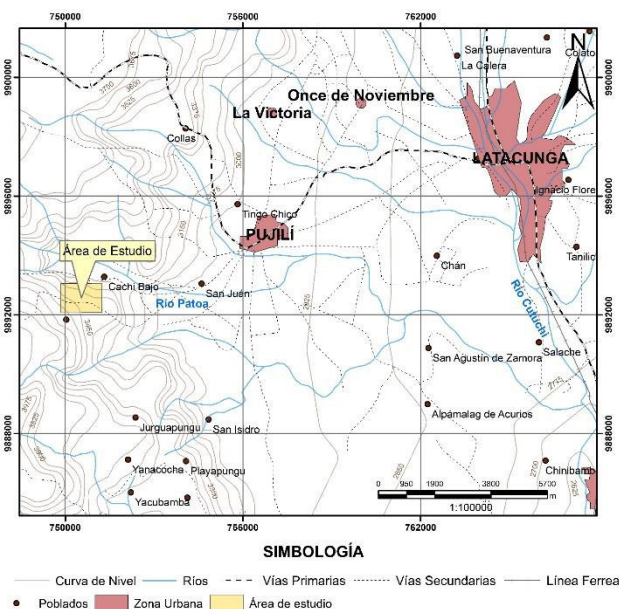


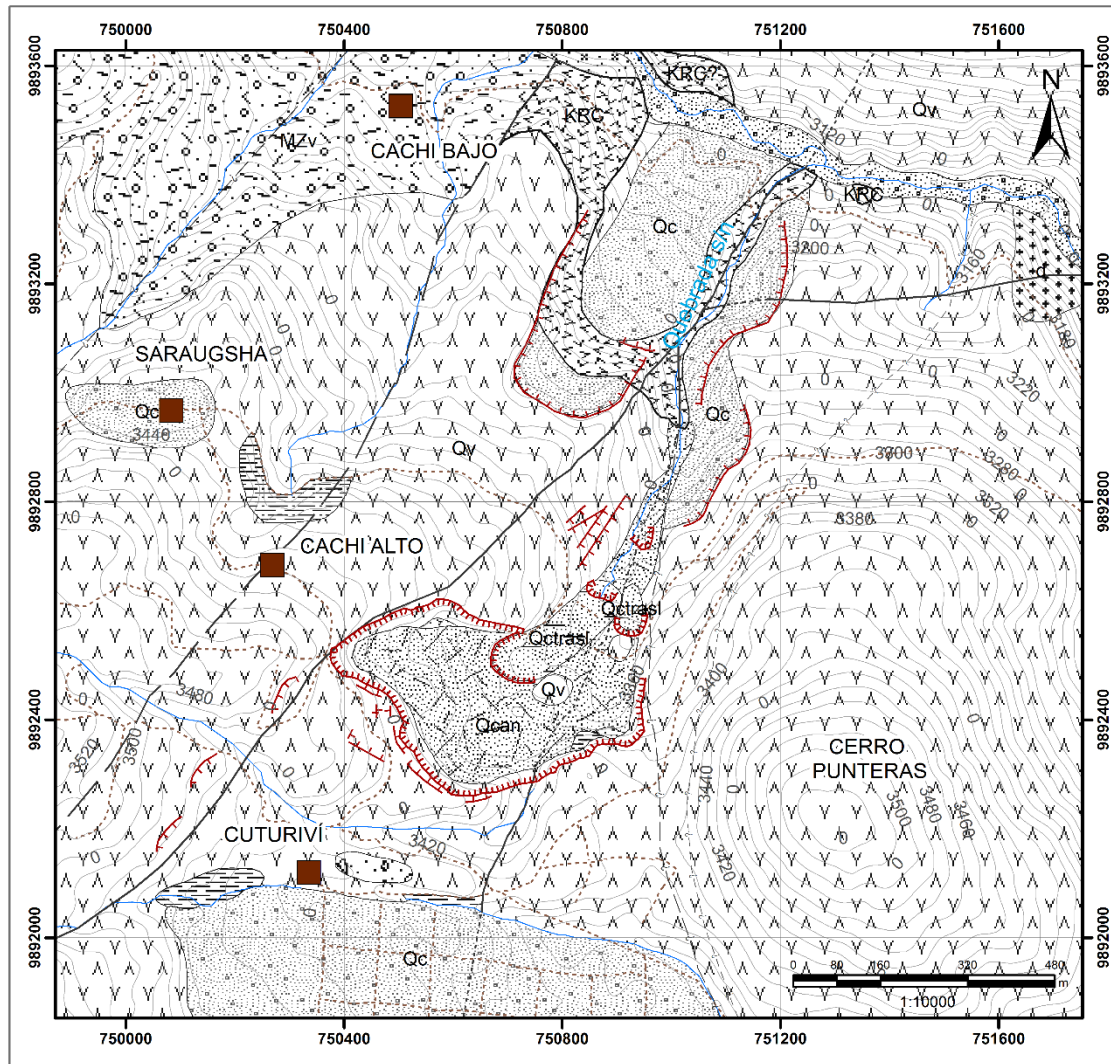
Figura 1. Esquema topográfico de las estribaciones orientales bajas de la cordillera Occidental y la zona occidental del Valle Interandino, incluyendo la localización del área de estudio, ubicada a unos 7 Km. al sur-oeste de Pujilí

En la zona sur del escarpe principal del movimiento en masa de Cachi Alto o corona del deslizamiento antiguo, ocurren varias estructuras que incluyen escarpes con rumbos NE-SW, NW-SE y E-W además de varias fracturas o grietas, algunas de las cuales están rellenas con suelo (Burga, 2019).

El origen y relación de estas estructuras con el fallamiento o los movimientos en masa aún es incierta.

Con respecto al tipo de movimiento en masa, además de los definidos por Cruden y Varnes (1996), Hutchinson (1988)

determina la ocurrencia de una variedad de procesos que se definen como deformaciones de ladera o deformaciones gravitacionales profundas (Deep-seated gravitational slope deformation, término en inglés).



LEYENDA GEOLÓGICA

- Aluvial
 - Coluvial de deslizamiento traslacional (Qctra)
 - Coluvial de deslizamiento antiguo (Qcan)
 - Coluvial (Qc)
 - Cangahua (Qv)
 - Volcanosedimentos
 - Brechas conglomeráticas
 - Lutitas
 - Areniscas, limolitas, brechas
 - Andesitas piroxénicas
 - Andesita basáltica
 - Dacitas (d)
 - Intrusivo indiferenciado
- Grupo Zumbagua (MZv) {
- Unidad Río Cala (KRC) {

SIMBOLOGÍA GEOLÓGICA

- Escarpe
- Falla cubierta
- Falla inferida
- Falla observada
- Lineamiento
- Contacto inferido

SIMBOLOGÍA TOPOGRÁFICA

- Poblados
- Curvas de nivel
- Vías
- Quebradas

Figura 2a. Esquema geológico-estructural de la zona de Cachi Alto y su área de influencia, incluyendo escarpes asociados a los deslizamientos principales (Modificado de Burga, 2019)

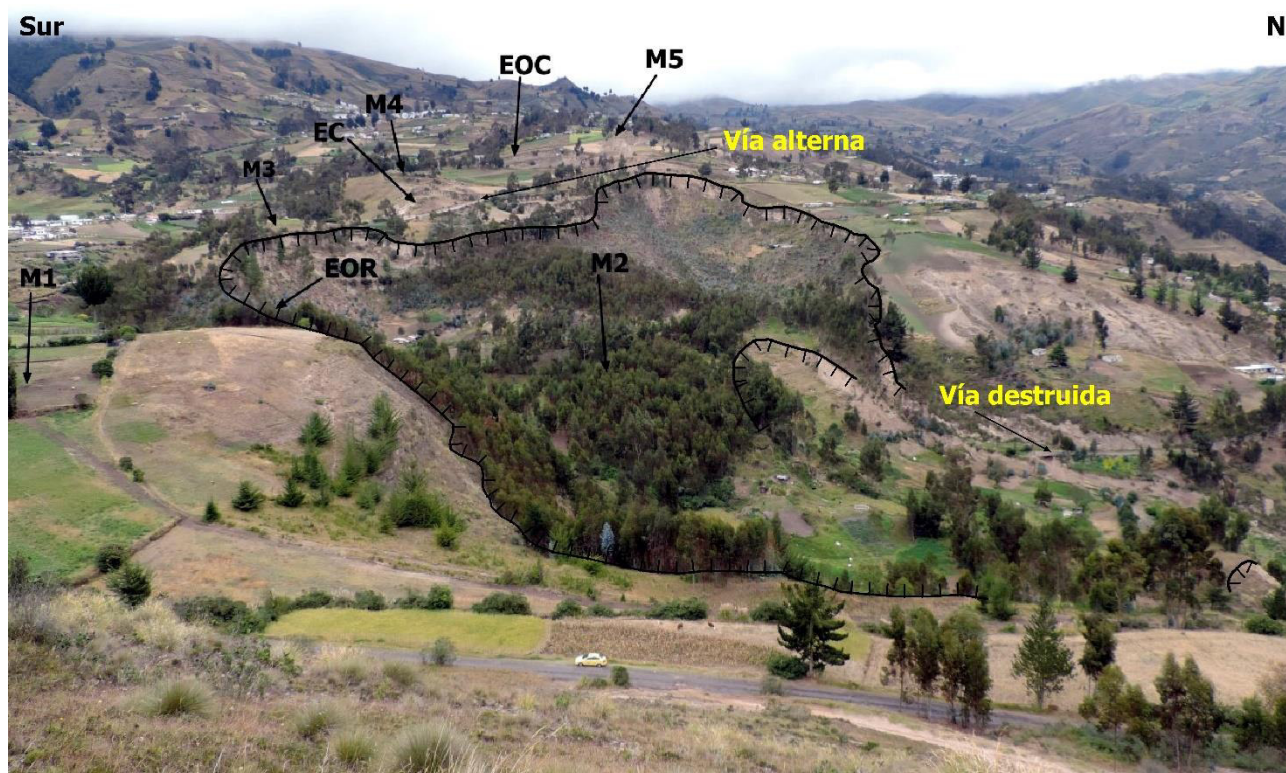


Figura 2b. Imagen mostrando el deslizamiento antiguo de Cachi Alto y los dos deslizamientos traslacionales, incluyendo la ubicación de los instrumentos de monitoreo ubicados en la corona del deslizamiento. El Mojón 2 (M2) y Extensómetro oriental (EOR) están ubicados en el cuerpo del deslizamiento y en el escarpe principal

Estos tipos de movimientos en masa presentan rasgos de deformación sin desarrollo de superficie de rotura definidas y con baja magnitud de velocidad y desplazamiento, además algunas deformaciones de ladera deben ser consideradas como precursoras de deslizamientos en gran escala (PMA: GCA, 2007).

La relación entre el fallamiento activo y regiones de alto relieve con movimientos en masa catalogados como deformaciones gravitacionales han sido determinados en varias regiones montañosas como Los Andes de Mérida, Venezuela (Audemard, et al., 2010) y Tien Shan Mountains, Asia Central (Teshebaeva, et al., 2019). Estos procesos descritos como deformaciones de laderas (slope deformation) o deformaciones gravitacionales profundas también son reportados por Riemer et al. (1988) en la Cordillera Real de los Andes.

Considerando la terminología de Cruden y Varnes (1996), el estado de actividad de los dos deslizamientos de pequeña y mediana magnitud son catalogados como activos, mientras del deslizamiento de gran magnitud es inactivo o antiguo (Burga, 2019). Los dos deslizamientos activos son condicionados por la actividad antrópica a la que se suma la morfología y la pluviosidad, mientras el deslizamiento antiguo es condicionado por actividad neotectónica (Burga, 2019).

3. CONTEXTO METODOLÓGICO

El primer paso de la investigación incluyó el diseño y construcción de los extensómetros con base en el modelo propuesto por León et. al (2007) y los mojones metálicos (Figura 3). La construcción de los equipos-instrumentos fue realizada por Pérez (2019).

Los extensómetros fueron utilizados para medir las dimensiones de las grietas. Los mojones metálicos en conjunto con la Estación Total permitieron establecer datos geodésicos absolutos (UTM X, UTM Y y Altura), con los cuales se definió el movimiento en los componentes horizontal (Este-Oeste o UTM X y Norte-Sur o UTM Y) y vertical (levantamiento o hundimiento). Cada extensómetro consiste de 2 tubos, 1 cable, 2 poleas, 1 regla metálica, 3 sujetadores del cable, 1 ceja de medición y 1 pesa.

El ensamblaje de los componentes forma dos postes denominados Tubos Fijo y Móvil (Figura 3a). El Fijo incluye una regla metálica, polea, sujetador metálico, ceja de medición y pesa. El Móvil incluye polea y sujetador metálico.

Por otra parte, cada mojón consiste de un tubo redondo, un perno compatible con la rosca del prisma óptico y placa metálica con 2 varillas de hierro corrugado como base (Figura 3b). La Estación Total es marca Trimble modelo 2 600 y tiene una precisión o fiabilidad de 1 mm + 1 ppm.

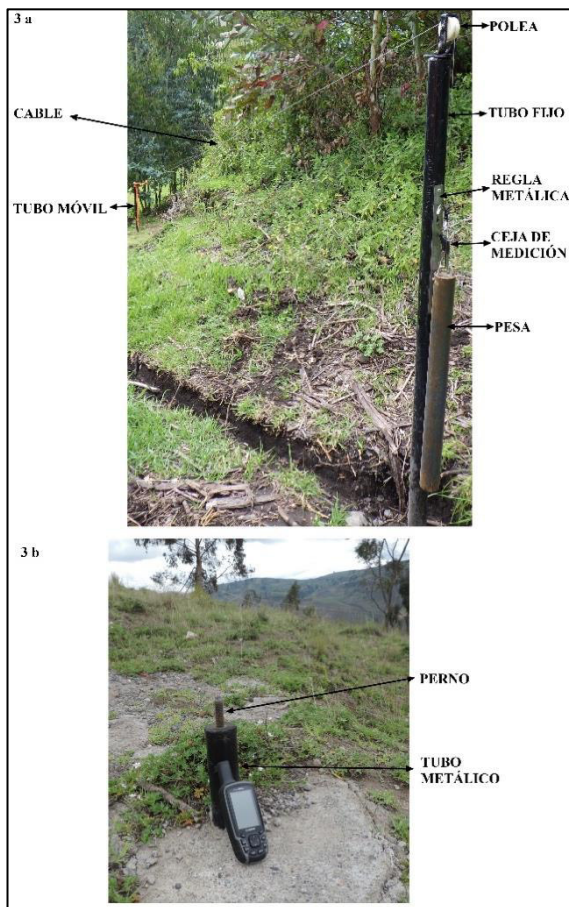


Figura 3. Extensómetro ensamblado e instalado, incluye los tubos implantados en la zona activa o inestable (Tubo móvil) y en la zona estable o sin movimiento (Tubo fijo), además de los componentes principales (3a). Mojón metálico instalado en el cerro Punteras denominado Estación Base, incluyendo el perno para instalar el prisma óptico y parte del tubo empotrado en un hoyo relleno de hormigón (3b)

El siguiente paso fue la instalación de los extensómetros y mojones, incluyendo el Mojón Base en los sitios previamente definidos (Figura 4). Las posiciones geográficas de los sitios fueron establecidas con un GPS GARMIN 64S. El mojón base está ubicado en el Cerro Punteras en el punto de coordenadas 751 237-9 892 235 (Sistema WGS84).

La sujeción de los tubos se realizó con concreto y fragmentos de rocas. El ensamblaje de los extensómetros se ejecutó en el sitio de emplazamiento. La investigación de campo ejecutada desde octubre de 2019 hasta marzo de 2020, incluyó el registro de datos de los extensómetros y Estación Total durante diez días y dos campañas de campo, respectivamente, además del cartografiado y levantamiento de información de deformaciones superficiales.

La información constituye la base con la cual se define el área total de la zona inestable, el estado de la actividad de la corona

del deslizamiento antiguo y la tendencia o dirección de los movimientos en masa.

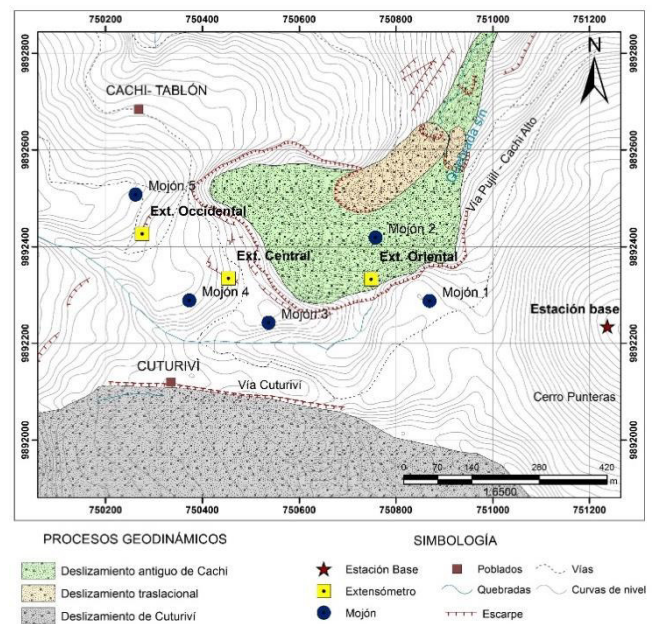


Figura 4. Esquema de los deslizamientos activos ubicado en la zona norte relacionados con quebrada s/n y el deslizamiento antiguo de Cachi Alto, incluyendo la ubicación de los extensómetros artesanales y los mojones

En cada uno de los lugares se excavaron hoyos de 100 cm de profundidad y 50 cm de diámetro. Todos los hoyos están excavados en cangahua, con excepción de los dos hoyos del Extensómetro Oriental, los cuales están excavados en depósito coluvio-aluvional.

4. ESTADO Y DISTRIBUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA DE CACHI ALTO-PUJILÍ

La gran cantidad de movimientos en masa en la zona de Cachi Alto y su área de influencia sugieren que la zona es susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa de diversa tipología, magnitud y estado de actividad (Figura 2). El desplazamiento de los cuerpos de los dos deslizamientos activos que ocurren en la zona de Cachi es variable desde ± 1 m hasta ± 15 m en un periodo de 6 meses, este último determinado en base al desplazamiento de una parte de la vía antigua Pujilí-Cachi Alto que atraviesa por la zona norte del deslizamiento antiguo de Cachi Alto.

En los deslizamientos catalogados como antiguos o inactivos donde ocurren deformaciones superficiales recientes como fracturas o grietas y escapes, la dinámica es imperceptible a los sentidos humanos. La determinación del estado de la actividad en esta zona está basada en datos cuantitativos registrados en los instrumentos y cualitativos levantados en las zonas donde están instalados los instrumentos y en el área de influencia de los mismos.

Las magnitudes de las grietas formadas en las zonas suroriental, sur central y suroccidental del movimiento en

masa en base del desplazamiento de los tubos móviles son variables (Tabla 1).

En el extensómetro oriental con eje predominante norte-sur entre el 24 de octubre de 2019 y el 17 de diciembre de 2020 alcanzó hasta 79,6 cms. En el extensómetro central con eje predominante norte-sur entre el 24 de octubre de 2019 y el 10 de marzo de 2021 alcanzó hasta 1 cm. En el extensómetro occidental con eje predominante este-oeste entre el 24 de octubre de 2019 y el 10 de marzo de 2021 alcanzó hasta 8 cm.

Los desplazamientos de los tubos móviles en los extensómetros oriental y occidental son prácticamente constantes (Figuras 5a y 5c), mientras en el extensómetro central el desplazamiento es muy variable, así entre el 24 de octubre de 2019 hasta el 13

de noviembre del mismo año no presenta movimiento y desde 9 de enero de 2020 hasta el 10 de marzo de 2020 el movimiento es anómalo (Figura 5b).

Los desplazamientos, con base en los datos geodésicos (Tabla 2), varían desde 0,002 a 1,302 metros (Tabla 3). Las direcciones o tendencias de los desplazamientos de los mojones en el componente horizontal son muy variables y tienden al NW, NE, SW y SE (Figuras 6a, 6b, 6c, 7d y 6e). En el componente vertical los desplazamientos de los mojones son mayormente asentamientos (Figuras 7a, 7b, 7d y 7e), con excepción del mojón 3 donde ocurre levantamiento (Figura 7c).

Tabla 1. Valores en la regla de medición y de los desplazamientos en los extensómetros oriental, central y occidental

EXTENSÓMETRO	FECHA	VALOR EN REGLA DE MEDICIÓN (CM)	VALOR DE DESPLAZAMIENTO ACUMULADO (CM)	OBSERVACIÓN
ORIENTAL	24/10/2019	29,0	0,0	Instalación-ensamblaje (Inicio de etapa 1)
	3/11/2019	22,2	6,8	Lectura 08:35 h, después de sismo cercano
	3/11/2019	21,5	7,5	Lectura 11:35 h, después de sismo cercano
	9/11/2019	17,0	12,0	
	13/11/2019	12,6	16,4	
	20/11/2019	5,3	23,7	Grietas más grandes
	22/11/2019	2,7	26,3	
	24/11/2019	0,0	29,1	Valor superó 1 mm escala de medición (Fin de etapa 1)
	24/11/2019	28,4	29,1	Recalibración de extensómetro, poste móvil inclinado con cabeceo (Inicio de etapa 2)
	17/12/2019	0,0	79,6	Valor superó 22,1 cm escala de medición (Fin de etapa 2)
CENTRAL	24/10/2019	29,2	0,0	Instalación-ensamblaje
	3/11/2019	29,2	0,0	Lectura después de sismo cercano
	9/11/2019	29,2	0,0	
	13/11/2019	29,2	0,0	
	20/11/2019	29,1	0,1	
	24/11/2019	29,1	0,1	
	17/12/2019	28,8	0,4	
	9/1/2020	28,2	1,0	
	19/01/2020	28,3	0,9	
	10/3/2020	28,2	1,0	
OCCIDENTAL	24/10/2019	29,0	0,0	Instalación-ensamblaje
	3/11/2019	28,5	0,5	Lectura después de sismo cercano
	9/11/2019	27,9	1,1	
	13/11/2019	27,9	1,1	Grietas N-S en pie de escarpe
	20/11/2019	27,8	1,2	
	22/11/2019	27,6	1,4	
	24/11/2019	27,6	1,4	
	17/12/2019	26,2	2,8	
	9/1/2020	25,8	3,2	
	19/01/2020	24,3	4,7	Ceja de medición reajustada en 24,3 cm $\pm$ 0,5 mm
	10/3/2020	21,0	8,0	

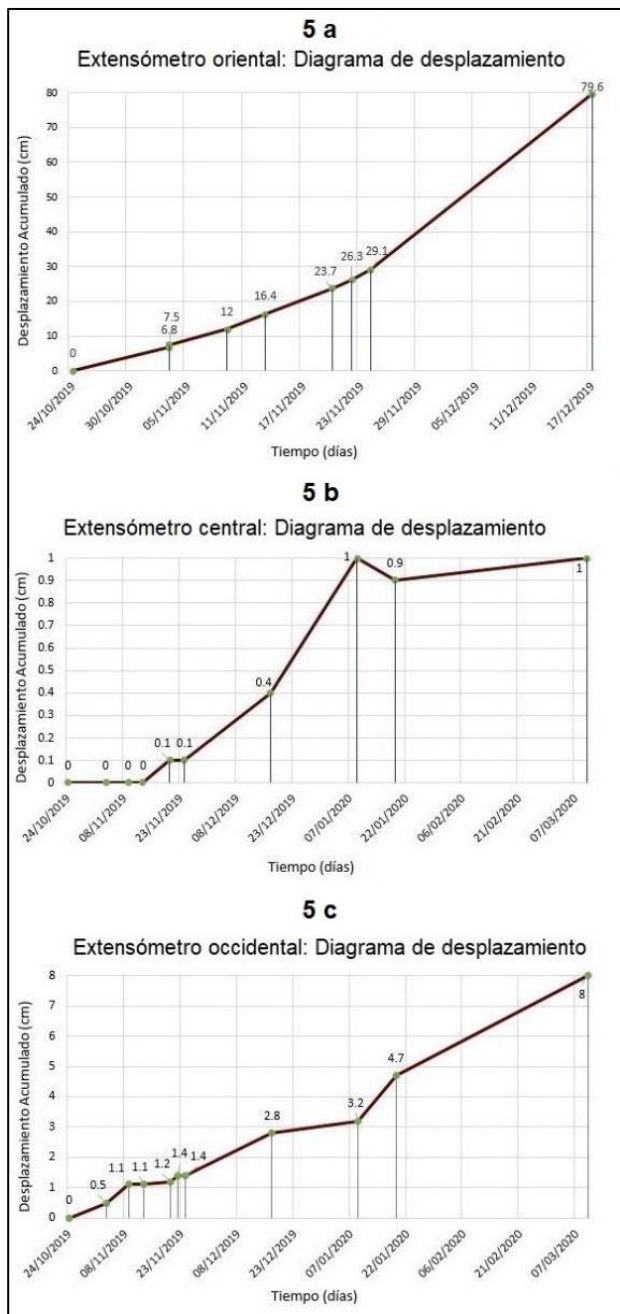


Figura 5. Valores de desplazamientos acumulados en los extensómetros oriental (5a), central (5b) y occidental (5c). El valor registrado del extensómetro oriental es de dos periodos

Tabla 2. Datos de longitud (UTM X), latitud (UTM Y) y elevación (Altura) registrados con Estación Total en tres campañas de campo

FECHA	COORDENADAS UTM		ALTURA m
	X	Y	
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 1			
OBSERVACIÓN: Ubicado 100 metros al costado derecho de la vía antes de la Y a Cachi Alto, en una división alta (zanja) de terrenos			
11/13/2019	750 869,609	9 892 288,072	3 408,319
12/17/2019	750 870,202	9 892 288,74	3 408,264
1/9/2020	750 869,373	9 892 288,514	3 408,125
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 2			
OBSERVACIONES: Ubicado en la zona del deslizamiento, en zona boscosa y en una elevación			
11/13/2019	750 758,363	9 892 418,996	3 364,71
12/17/2019	750 759,195	9 892 419,371	3 364,665
1/9/2020	750 759,86	9 892 419,956	3 364,417
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 3			
OBSERVACIONES: Ubicado 80 metros, costado derecho de la vía a Cachi, tras casa de señor Sixto			
11/13/2019	750 536,722	9 892 242,528	3 431,656
12/17/2019	750 536,706	9 892 242,511	3 431,803
1/9/2020	750 536,53	9 892 242,488	3 431,643
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 4			
OBSERVACIONES: Ubicado 150 metros al oeste del extensómetro occidental			
11/13/2019	750 373,452	9 892 288,842	3 460,822
12/17/2019	750 373,399	9 892 287,54	3 460,789
1/9/2020	750 374,561	9 892 287,328	3 460,721
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 5			
OBSERVACIONES: Ubicado a 100 metros al noroeste del extensómetro occidental			
11/13/2019	750 249,384	9 892 473,800	3 493,494
12/17/2019	750 249,152	9 892 473,682	3 493,487
1/9/2020	750 249,072	9 892 473,621	3 493,485
ESTACIÓN CERRO PUNTERAS-MOJÓN 6			
OBSERVACIONES: Ubicado a 400 metros al noroeste del extensómetro occidental			
11/13/2019	749 967,984	9 892 643,135	3 507,719
12/17/2019	749 967,991	9 892 643,202	3 507,709
1/9/2020	749 967,993	9 892 643,206	3 507,705

Tabla 3. Valores de los desplazamientos de los 6 mojones en los dos periodos de monitoreo. Los valores negativos en X, Y y H indican movimientos relativos

MOJÓN	DESPLAZA_		
	MIENTO X (m)	DESPLAZA_ MIENTO Y (m)	DESPLAZA_ MIENTO H (m)
1	-0,593	-0,668	0,055
	0,829	0,226	0,139
2	-0,832	-0,375	0,045
	-0,665	-0,585	0,248
3	0,016	0,017	-0,147
	0,176	0,023	0,16
4	0,053	1,302	0,033
	-1,162	0,212	0,068
5	0,232	0,118	0,007
	0,08	0,061	0,002
6	-0,007	-0,067	0,01
	-0,002	-0,004	0,004

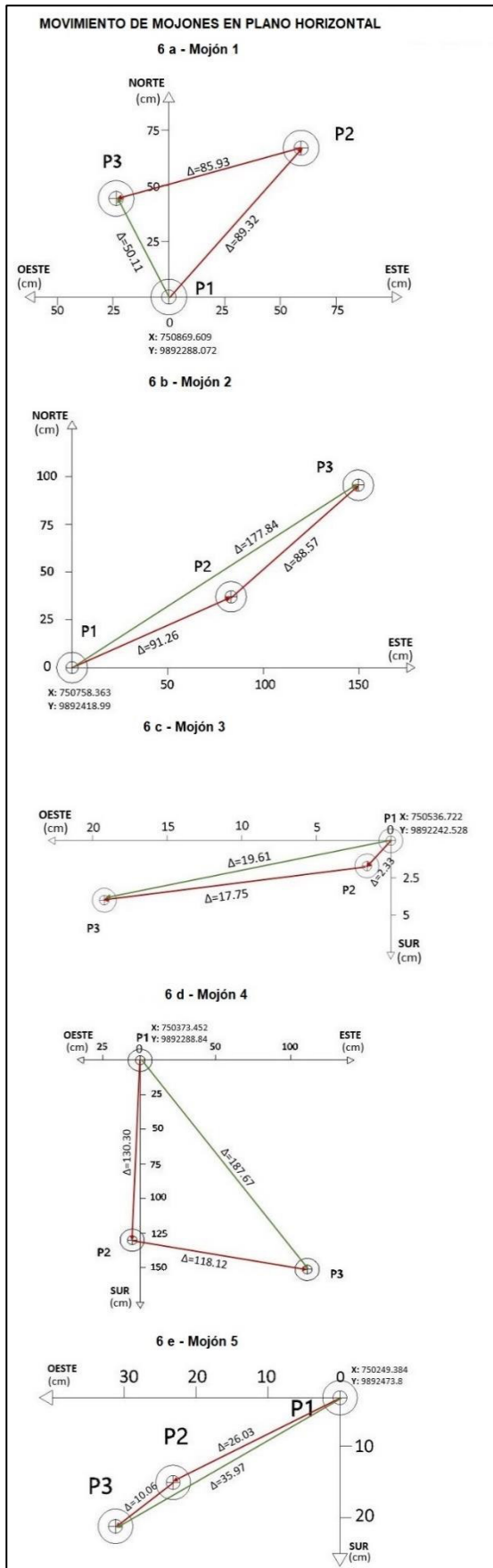


Figura 6. Diagramas mostrando los desplazamientos de los mojones en el plano horizontal

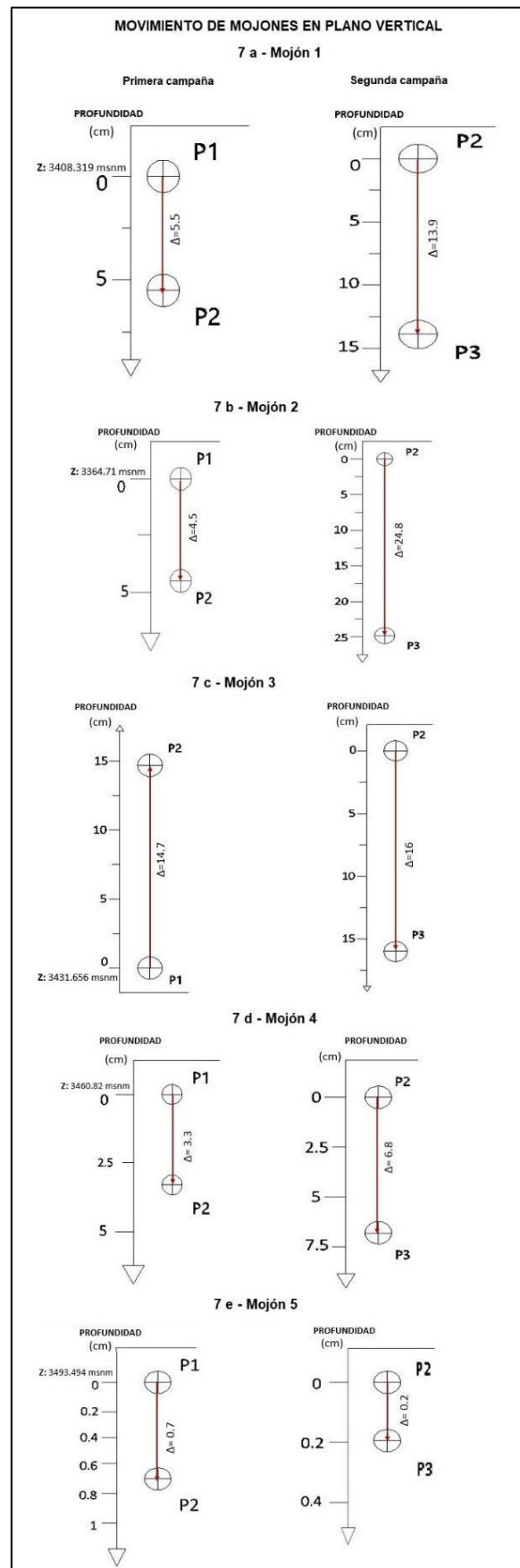


Figura 7. Diagramas mostrando los desplazamientos de los mojones en el plano vertical

Las deformaciones están localizadas en la zona sur del deslizamiento antiguo de gran magnitud, específicamente en la corona del deslizamiento mencionado, entre los extensómetros central y occidental. Además, otra deformación ocurre en los bordes suroriental y oriental del deslizamiento antiguo. Las deformaciones incluyen principalmente grietas de dimensiones variables. La grieta más occidental tiene ± 200 metros de longitud, 5 centímetros de abertura y rumbo preferencial NE-SW (Figura 8).

La grieta más oriental tiene más de ± 350 metros de longitud, ± 50 centímetros de abertura y rumbo preferencial mayormente NE-SW. Adicionalmente, en la zona norte del deslizamiento antiguo, en la vía antigua a Cachi Alto ocurre un bloque levantado en contrapendiente. La capa superficial del bloque está constituida por cangahua.



Figura 8. Extensómetro artesanal occidental, a la izquierda Tubo fijo, en el centro Tubo móvil con escarpe antiguo y grieta reciente. La imagen de la derecha incluyendo escala gráfica muestra la grieta de rumbo NE-SW

5. DISCUSIÓN

El monitoreo con los extensómetros y la estación total indica que las zonas ubicadas al suroeste, sur y sureste del escarpe principal del deslizamiento antiguo de gran magnitud de Cachi Alto presentan movimientos en los componentes horizontal y vertical. En el componente horizontal los bloques relacionados con los Tubos móviles y los mojones 3, 4 y 5, ubicados en la zona suroccidental tienden a desplazarse al SE, SW y NE, mientras el mojón 1 ubicado en la zona suroriental presenta un desplazamiento al NW (Figura 9). Por otra parte, el Tubo móvil y el mojón 2 ubicados en el cuerpo del deslizamiento antiguo presentan desplazamientos al NE (Figura 9).

Los desplazamientos o movimientos ya mencionados y la ocurrencia de grietas fuertemente inclinadas, recientes y de dimensiones variables en la zona de la corona del deslizamiento antiguo, estructuras paralelas y perpendiculares a los sistemas de fallamiento, así como en varios sectores del cuerpo del deslizamiento antiguo, determinan que toda zona relacionada con la corona del deslizamiento antiguo de Cachi Alto y el cuerpo del mencionado deslizamiento presentan evidentes indicios de movimiento, aunque en base a información cartográfica geológica el deslizamiento antiguo fue catalogado como un deslizamiento inactivo (Burga, 2019). Sin embargo, considerando los datos obtenidos y la clasificación de Cruden y Varnes (1996), tanto la zona de la

corona del deslizamiento antiguo, así como la zona relacionada con el cuerpo del deslizamiento son catalogados como movimientos en masa reactivados.

Las evidencias cuantitativas y cualitativas de reactivación sugieren que el área ubicada al S y SW del escape principal o corona del deslizamiento potencialmente es inestable, aunque la caracterización geomecánica de la cangahua determinó que los taludes del escarpe principal constituidos por cangahua, son estables (Analuisa, 2019).

Con respecto a las causas o el origen de la reactivación de estos movimientos en masa que ocurren en la zona de la corona del deslizamiento antiguo de Cachi Alto, aunque en la zona ocurren indicios de neotectonismo (Burga, 2019), este factor como condicionante todavía no es muy concluyente, razón por la cual la reactivación posiblemente está relacionada con la alta inestabilidad del cuerpo del mencionado deslizamiento.

Considerando el rumbo de las grietas paralelas a los escarpes y la tendencia de los procesos, el origen más probable de los movimientos en masa de la corona del deslizamiento antiguo está condicionado por las estructuras geológicas asociadas con actividad neotectónica, como planos de fallas geológicas o grietas reportadas por Burga (2019). Esto en razón que las deformaciones recientes o indicios de inestabilidad coinciden con deformaciones superficiales antiguas (escarpes de movimientos en masa antiguos).

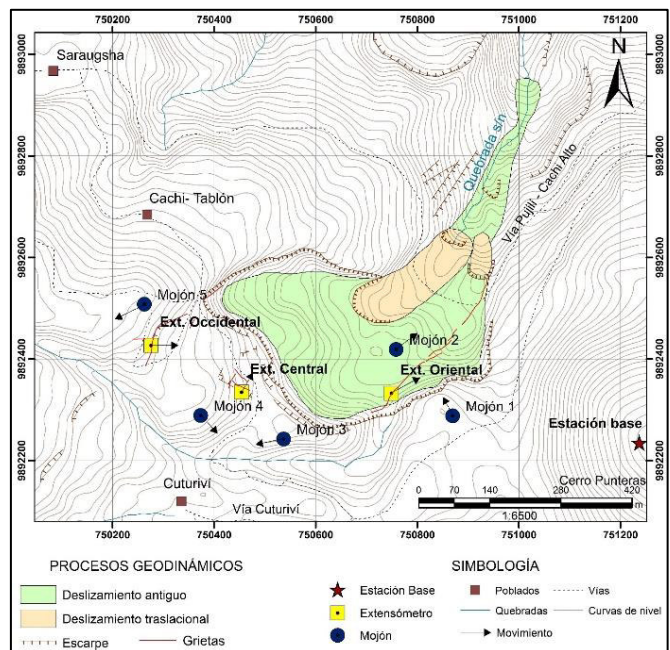


Figura 9. Dirección de desplazamiento o tendencia del movimiento de los mojones utilizados en el monitoreo con Estación Total. Los mojones que se encuentran en la zona sur del deslizamiento antiguo- corona- presentan movimientos con tendencia principalmente al sur. Los mojones 1 y 2 presentan movimientos con tendencia al norte

En este contexto, la hipótesis planteada es que la reactivación del movimiento en masa de Cachi Alto tiene relación con la deformación superficial asociada con un proceso geológico denominado Deformación Gravitacional Profunda en Laderas,

aspecto sugerido también por Costa C. (Comunicación personal). Estos procesos geológicos presentan rasgos de deformación sin desarrollo de superficie de rotura definidas y baja magnitud de velocidad y desplazamiento (PMA:GCA, 2007), características que se presentan especialmente en la zona relacionada con la corona del deslizamiento antiguo de Cachi Alto. Deformaciones gravitacionales profundas de laderas asociadas con fallamiento activo han sido registrados en muchas regiones montañosas, incluido en los Andes (Audemard, et al., 2010 y Boivin, 2020), aunque en Ecuador la información sobre este tema es escasa.

6. CONCLUSIONES

Los movimientos tanto horizontales como verticales determinados con el monitoreo instrumental, y las deformaciones superficiales (grietas y escarpes) determinan que toda la zona ubicada al sur del deslizamiento antiguo de Cachi Alto, conocida como corona de deslizamiento, forma parte de un movimiento en masa catalogado como reactivado. Los movimientos y las deformaciones se formaron durante el último trimestre del 2019 y el primer trimestre del año 2020. La zona reactivada alcanza un área de $\pm 0,1 \text{ km}^2$.

Las magnitudes de los movimientos, son muy variables, sugiriendo entonces que el comportamiento dinámico de los materiales es muy heterogéneo. Además, considerando que el talud general esta inclinado al E, la tendencia de los desplazamientos es muy variable y en razón que los bloques se mueven al N, E y S, concluyendo que los movimientos no son compatibles o no tienen relación con los típicos movimientos en masa catalogados como deslizamientos.

Las características mencionadas sugieren que las deformaciones superficiales están relacionadas con procesos de acomodamiento de bloques en una zona afectada por deformación gravitacional profunda de laderas. Por tal razón es recomendable continuar con el monitoreo usando el mismo instrumental y mediante la aplicación de otras técnicas (geodésicas usando GPS diferencial o Sensores Remotos usando Ortofotos), aprovechando incluso los artefactos ya instalados (mojones metálicos).

El monitoreo debe complementarse con la implementación de un pluviómetro para determinar si las reactivaciones coinciden con periodos de alta pluviosidad, en razón que la estación pluviométrica más cercana se encuentra en el centro del valle Interandino en el Aeropuerto Cotopaxi a $\pm 15,7 \text{ km}$ al ENE.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos de los movimientos en masa de Cachi Alto, Pujilí, Ecuador, se concluye que con una baja inversión económica ($\pm \text{USD } 3000$ considerando la construcción de los componentes, trabajo de campo para socialización, instalación y registro de datos) se puede obtener resultados confiables, los cuales son útiles para la toma de decisiones oportunas, que permiten precautelar la seguridad de la comunidad. La confiabilidad está basada en la comparación entre los datos de los instrumentos, así como con las deformaciones superficiales cartografiadas, y la seguridad que los instrumentos no fueron alterados o movidos por causas antrópicas (acción de los animales).

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Universidad Central, en especial a la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, así como a la Dirección de Investigación por los fondos aportados y las facilidades prestadas. Por otra parte, agradecemos al Ing. Elías Ibadango por su aporte y la traducción al inglés, así como también a los estudiantes de la asignatura de Geología de Campo (periodo 2019-2020) de la FIGEMPA que apoyaron en el trabajo de campo y en el registro de datos, en especial a Pamela Acosta y Edison Caizaluisa. Finalmente, agradecemos al Gobierno Descentralizado del Cantón Pujilí, en especial a Evelyn Otañez por la colaboración y apoyo en la organización del trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Analuisa, E. (2019). *Estabilización de laderas en la zona del deslizamiento de Cachi, ubicado en la parroquia y cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi*. Trabajo teórico de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero de Minas. Universidad Central del Ecuador, Quito.
- Audemard, F. A., Beck, C. & Carrillo, E. (2010). Deep-seated gravitational slope deformations along the active Boconó Fault in the central portion of the Mérida Andes, western Venezuela. *Geomorphology*, 124 (3/4), 164-177. Elsevier.
- Boland, M., Pilatasig, L., Ibadango, E., McCourt, W., Aspden, J., Hughes, R., & Beate, B. (2000). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental entre 0° and 1°N. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica*. CODIGEM-BGS. Quito.
- Burga, S. (2019). *Caracterización Litológica – Estructural y Evaluación de los Deslizamientos en la zona de Cachi, Pujilí, Provincia de Cotopaxi*. Trabajo de Titulación, modalidad proyecto de investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero en Geología. Universidad Central del Ecuador. Quito.
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996). *Landslide types and processes*. In: Landslides, Investigation and Mitigation. Special Report 247, Transportation Research Board, Washington, 36–75.
- Hughes, R., Bermúdez, R. y Espinel, G. (1998). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° y 1°S. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental*. Servicio Geológico Británico-Ministerio de Energía y Minas. Quito – Ecuador.
- Hutchinson, J.N. (1988). *Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrogeology*, en Memorias, 5th International Conference on Landslides, Lausanne, p. 3-35.
- León, E. Oleas, M. Pilatasig, L. (2007). *Monitoreo de deslizamientos con extensómetros de fabricación casera de bajo costo. Caso de estudio Deslizamiento Tumba-San Francisco, Provincia de Chimborazo, País Ecuador*. Gestión de Riesgos por deslizamientos. Editor Guardado, R. GEDES 2007.
- Mc Court, W. J., Duque, P. & Pilatasig, L. (1997). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental entre 1° S y 2° S. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica*. CODIGEM-BGS. Quito.
- Pérez, A. (2019). *Informe del Proceso de Preparación, Adecuación y Ensamblaje del Prototipo del Extensómetro Artesanal y Mojón Metálico. Proyecto Evaluación del Estado de Actividad de los Movimientos en Masa, usando Extensómetros Artesanales y Estación Total, Caso de Estudio Cachi Alto-Pujilí*. Dirección de

Investigación. Universidad Central del Ecuador. Informe no publicado.

Pilatasig, L., Ibadango, E., Bustillos, J., Ruiz, G., Troncoso, L., Mateus, A. & Alban, G. (2019). *Evaluación de Movimientos en Masa y Relación con la Litoestratigrafía y el Tectonismo, Cachi Alto-Pujilí*. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental. Programa de Vinculación con la Sociedad UCE. Informe no publicado.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para la Comunidades Andinas. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No 4, 432 p., 1 CD-ROM.

Riemer, W. Locher, T. & Nuñez, I. (1988). Mechanics of deep seated mass movements in metamorphic rocks of the Ecuadorian Andes. *Landslides*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides. Bonnard, C. Editor. A.A.Balkema / Rotterdam / Brookfield / 1988.

Referencias electrónicas

Boivin, C. (2020). Long and short time evolution of deep seated gravitational slope deformation: contribution to knowledge of phenomena for the management of alea in the Alpine mountains. *Université de Strasbourg Université de Strasbourg, Institut de physique du globe de Strasbourg (IPGS), Déformation Active*, France. Obtenido de: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4890>. (Octubre, 2020).

Teshebaeva, K., Ehtler, H., Bookhagen, B., Strecker, M. R. (2019): Deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD) and slow moving landslides in the southern Tien Shan Mountains: new insights from InSAR, tectonic, and geomorphic analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44, 12, pp. 2333—2348. Obtenido de: DOI: <http://doi.org/10.1002/esp.4648>.

BIOGRAFÍAS



Luis Felipe Pilatasig Moreno, nacido el 7 de noviembre de 1964 en la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi. Estudió en la Universidad Central del Ecuador donde obtuvo el título de Ingeniero en Geología. Realizó estudios de posgrado en la Universidad de Exeter de Gran Bretaña. Ejerció funciones de Técnico y Director en el Ministerio de Energía y Minas-Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, e Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico por 20 años. Docente Universitario por más de 7 años. Actualmente Docente-Investigador de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA) de la Universidad Central del Ecuador.



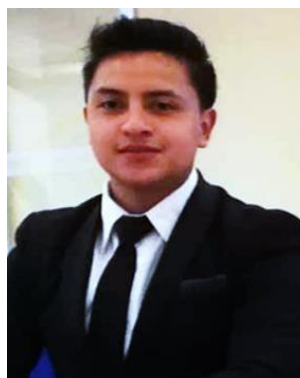
Jorge Eduardo Bustillos Arequipa, nacido el 15 de abril de 1981 en el Cantón Saquisilí de la Provincia de Cotopaxi. Estudió en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el título de Ingeniero Geólogo. Estudios de posgrado en la Universidad Sophia Antipolis de Nice-Francia y la Universidad de

Ginebra en Suiza. Sismólogo y Vulcanólogo del IGEPN por 10 años, Docente Universitario por más de 13 años. Director de la Carrera de Ingeniería en Geología de la Universidad Central del Ecuador (UCE) durante 5 años. Actualmente Docente-Investigador de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA) de la UCE.



Luis Fabián Jácome Calderón, nacido el 6 de junio de 1951 en la ciudad de Atuntaquí, provincia de Imbabura. Estudió en la Universidad Central del Ecuador donde obtuvo el título de Ingeniero en Minas. Realizó estudios de posgrado en la Universidad Central del Ecuador-Universidad de Huelva de España. Ejerció funciones técnicas en la

Corporación Nacional del Cobre de Chile, CODELCO-CHILE, MINERA ANDINA, Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos INERHI-Dpto. de Geotecnia, AGROMAN, Instituto Ecuatoriano de Minería-INEMIN, Dirección Nacional de Minería-MEM y Agencia de Regulación y Control Minera. Es Docente Universitario de la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA) de la Universidad Central del Ecuador.



Alexander David Mariño Moyón, oriundo de la ciudad de Guaranda. Se graduó de Ingeniero en Geología de la Universidad Central del Ecuador en 2021. En 2018 participó en el proyecto “Evaluación geológica-estructural y caracterización del deslizamiento de Cachi-Santa Bárbara”. Se desempeñó como geólogo de exploración en el proyecto minero Fruta del

Norte en 2019. En su trayecto académico se destacó como miembro de la Asociación de Estudiantes y AAPG STUDENT

CHAPTER-SEDE UCE, promoviendo eventos educativos y capacitaciones; destacando habilidades de liderazgo; participó en numerosos congresos orientados a cartografía y exploración geológica.

Modelo de Base Fenomenológica de un Reformador de Etanol con Vapor de Agua

Gómez Giraldo, Simón ¹  ; González Jiménez, David ^{1,*}  ; Álvarez, Hernán ¹ 

¹Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Departamento de procesos y energía, Medellín, Colombia. Grupo Kalman

Resumen: Se propone un modelo semifísico de base fenomenológica (MSBF) para el proceso de reformado de bioetanol con vapor de agua para la producción de hidrógeno en un microrreactor tipo monolítico de tres etapas (deshidrogenación de etanol, reformado de acetaldehído y desplazamiento con vapor de agua). El modelo desarrollado consta de 16 ecuaciones diferenciales para cada partición del reactor, con lo que se logra representar la evolución temporal y espacial de las fracciones molares de los compuestos involucrados en el proceso y la temperatura de la fase gaseosa en cada partición. La simulación del modelo permitió verificar su validez con los resultados experimentales reportados en la literatura.

Palabras clave: Reformado de etanol, producción de hidrógeno, modelado semi-físico, microrreactor, simulación de procesos.

Phenomenological Based Model of Ethanol Reforming Using Steam

Abstract: This document proposes a phenomenological based semi-physical model (PBSM) for ethanol reforming process in a three-stage (ethanol dehydrogenation, acetaldehyde reforming and water-gas-shift) low-temperature monolithic micro-reactor. The integrated model consists of 16 differential equations for each partition, representing the time and space dynamics of each species molar fractions and gas phase temperature on the three stages of the process. This model is fitted to represent correctly the kinetic and transport phenomena inherent to the process and the species involved as well as the effects of temperature change on process variables. The model simulations allow to verify the model validity regarding experimental data obtained from the literature.

Keywords: Ethanol reforming, hydrogen production, semi-physical modeling, micro-reactor, process simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Aproximadamente, el 80 % de la demanda energética mundial es satisfecha por los combustibles fósiles, dichas fuentes de energía tienen asociadas una alta emisión de gases de efecto invernadero (fundamentalmente dióxido de carbono). Además, estas fuentes fósiles de energía están limitadas, por ser un recurso no renovable lo que implica que a futuro se presente un agotamiento de los hidrocarburos en el mundo.

En los últimos años, han surgido alternativas a partir de recursos renovables que permiten dar solución a los problemas de las fuentes de combustibles fósiles, entre las cuales se destacan las celdas fotovoltaicas, los aerogeneradores y las celdas de combustibles. Estas últimas han captado una mayor atención en términos de investigación tecnológica, siendo las celdas PEMFC (*proton-exchange membrane fuel cell*), las más destacadas por introducir mejoras en términos de eficiencia energética y selectividad en el transporte de los iones hidronio (H^+). Estas celdas utilizan hidrógeno gaseoso como combustible, por lo que la

demanda inmediata es por procesos que produzcan hidrógeno de manera limpia. Aparecen en este grupo los procesos de reformado de etanol como promisorios y de alto rendimiento, con la ventaja de disponer de etanol desde procesos fermentativo a partir de biomasa (García, 2012).

Existen diferentes estudios (García, 2012; Akande et al., 2006), que dan cuenta de la eficiencia del proceso de reformado de etanol con vapor de agua para la producción de hidrógeno molecular, el cual luego se usa como alimento para pilas de combustible. El proceso de reformado, específicamente el reformado de alcoholes con vapor de agua para la producción de hidrógeno, es un sistema complejo en el que se presentan múltiples reacciones. Particularmente, en Francesconi (2008) el reformado se hace con temperaturas de operación superiores a 503 K, siendo el metano, óxidos de carbono e hidrógeno los principales productos. La pureza final del hidrógeno que se obtiene depende de la ocurrencia o no de reacciones indeseadas, especialmente las reacciones que tengan como productos al metano, acetona y etileno, puesto que compiten con el hidrógeno molecular por el hidrógeno atómico.

*dagonzalezji@unal.edu.co

Recibido: 26/01/2021

Aceptado: 04/01/2022

Publicado: 01/02/2022

10.33333/tp.vol49n1.03

CC 4.0

En la actualidad, el proceso de reformado de etanol se lleva a cabo en reactores catalíticos de tamaño laboratorio (García, 2012). Generalmente, los catalizadores usados en el reformado de etanol consisten en un metal soportado en un óxido inorgánico. El soporte ejerce una influencia importante sobre el proceso actuando como elemento dispersante y estabilizante de las partículas metálicas del catalizador. La elección del soporte es un factor clave para una buena estabilidad del catalizador, teniendo un efecto muy fuerte sobre la actividad y la selectividad del metal (Fogler, 2004). El escalado a nivel industrial de los reactores catalíticos ha sido un paso limitante, principalmente por el correcto dimensionamiento de los volúmenes del reactor, los caudales de alimento y por problemas de operación como las sobrepresiones, puntos calientes en el reactor, compactación del catalizador y obstrucciones en el reactor (Francesconi, 2008). Estos problemas se pueden solucionar contando con un modelo lo más preciso posible del proceso. Contando con el modelo, el diseño, el escalado y la operación pueden optimizarse para resolver los problemas de la catálisis.

El proceso de reformado de etanol con vapor de agua resulta particularmente difícil de modelar debido a la existencia de varios catalizadores en el reactor, así como múltiples reacciones y variables de proceso involucradas. Sin embargo, existen trabajos que ofrecen una interpretación efectiva de la cinética química, lo que es un punto de partida para abordar el modelado del reactor. Cifuentes et al. (2019) proponen un modelo no isotérmico tridimensional para un reactor de reformado de etanol de paredes catalíticas. La base para ese modelo es una simulación en CFD (*computational fluid dynamics*). Los autores modelan mediante diferencias finitas tres reacciones bajo diferentes condiciones de operación. Los resultados de la simulación del modelo arrojaron un rendimiento máximo de producción de hidrógeno de 80 % a una temperatura de 1150 K y una presión de 4 bar. Por su parte, en Afolabi et al. (2021) reportan el reformado de etanol usando un modelo micro-cinético validado con datos experimentales de un reformado sobre un catalizador de Ni/SiO_2 .

La mayoría de los modelos propuestos en la literatura para el proceso de reformado de etanol con vapor de agua en un reactor de paredes catalíticas, se ha enfocado en ecuaciones diferenciales (EDs) de segundo orden en el espacio y en el tiempo, con ajuste paramétrico desde datos experimentales (Cifuentes et al., 2019). Esa tendencia, aunque efectiva y confiable, interfiere directamente en la interpretabilidad del modelo y presenta una mayor dificultad en términos de simulación e interpretabilidad, comparada con modelos que usan EDs de primer orden. Siguiendo esa línea, el presente trabajo aborda el modelado del proceso de reformado de bioetanol para la obtención de hidrógeno, pero usando EDs de primer orden, con parámetros concentrados.

El modelo obtenido es una herramienta para diseñar, escalar y optimizar la operación del proceso. Con esto, se facilita la toma de decisiones en las aplicaciones futuras de esta tecnología para la producción de energías limpias. Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se presenta la pre-construcción del modelo, que comprende los pasos 1 y 2 del procedimiento de modelado que se sigue (Álvarez, 2017). Luego, en la Sección 3

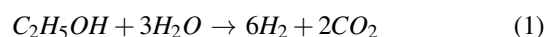
se desarrolla la construcción del modelo (pasos 3 a 7), mientras que en la Sección 4 se finaliza la aplicación del método con la solución y validación del modelo (pasos 8 a 10). Se cierra con las conclusiones y trabajos futuros.

2. PRE-CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Este es el primer bloque de desarrollo del modelo siguiendo la metodología mencionada para el modelado. Se recurre a presentar el modelo por bloques para hacer más clara su deducción.

2.1 Descripción del proceso y objetivo de modelado

El proceso a modelar es el reformado de bioetanol con vapor de agua, del cual se obtienen hasta seis moléculas de hidrógeno (H_2) por cada molécula de etanol (C_2H_5OH). La reacción global del proceso (Ecuación (1)) implica el rompimiento de un enlace $C-C$, por lo cual es necesario el catalizador adecuado y la energía disponible suficiente.



El proceso de reformado se lleva a cabo en un reactor monolítico de tres etapas, cilíndrico de material cerámico, al cual se alimenta etanol y agua, ambos como vapores. El reactor tiene un calentamiento externo para garantizar la temperatura de operación, lo que se logra desde el paralelepípedo cerámico que contiene al canal cilíndrico. Este tipo de reactores ofrecen alta área superficial en comparación con el volumen del reactor. Los canales de bajo diámetro, hacen que los recorridos radiales de transferencia de masa entre la fase gaseosa y la superficie del sólido sean muy cortos. Las paredes de los canales tienen diferentes catalizadores adheridos, dependiendo de la etapa. En el caso que se trata en este trabajo, las zonas son: *i*) la de entrada, donde ocurre la deshidrogenación del etanol, para lo que se usa dióxido de estaño como catalizador (SnO_2), *ii*) la intermedia, en la que se da el reformado del acetaldehído sobre un catalizador de cobalto-hierro, y *iii*) la final, en la que sucede el desplazamiento con vapor de agua, usando óxidos férrico y crómico (Fe_2O_3 y Cr_2O_3 , respectivamente) como catalizadores.

García (2012) presenta la caracterización de los catalizadores bajo condiciones de reacción *in situ*, usando espectroscopía infrarroja, demostrando que las reacciones que predominan en un proceso de reformado de etanol con vapor de agua son las que se discuten en la Tabla 1. Allí también se reportan las ecuaciones cinéticas para tales reacciones.

El objetivo del modelo es representar los cambios de las concentraciones de todas las especies involucradas en las reacciones químicas, a medida que fluyen por los canales del reactor en dirección axial. También se deben predecir los cambios de temperatura, tanto del sólido como del gas. Estos cambios se dan en respuesta a los cambios en las condiciones operacionales del proceso.

Tabla 1. Reacciones involucradas en el proceso de reformado de etanol¹

	Deshidrogenación de etanol	Reformado de acetaldehído	Desplazamiento vapor de agua
<i>Zona del reactor</i>	Primera etapa del reactor	Segunda etapa del reactor	Tercera etapa del reactor
<i>Ecuación química</i>	$C_2H_5OH \rightarrow H_2 + C_2H_4O$	$C_2H_4O + H_2O \rightarrow 3H_2 + 2CO$	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$
<i>Tipo de catalizador</i>	SnO_2 , dióxido de estaño	$Co(Fe) - Cr_2O_7$, Cobalto-hierro	$Fe_2O_3 - Cr_2O_3$, óxido férrico y óxido crómico
<i>Cinética de reacción</i>	$r = -k \times p_{C_2H_5OH}$	$r = -k \times p_{CH_3CHO}$	$r = -k \times (p_{CO} \times p_{H_2O} \times (1 - \frac{1}{K_{eq}})) \times \frac{p_{CO_2} \times p_{H_2}}{p_{CO} \times p_{H_2O}}$
<i>Características destacables</i>	El H_2 generado en esta etapa crea atmósfera reductora sobre catalizador de segunda etapa	Soporte de óxido de zinc dopado con sodio	Posible que se de desde segunda etapa, pero a velocidad despreciable.

¹ (Sierra et al., 2017)

2.2 Hipótesis de Modelado y Nivel de Detalle

La hipótesis de modelado en este caso corresponde a la de un reactor de flujo pistón (*plug flow reactor* PFR). A medida que los reactivos avanzan axialmente a través del canal, los perfiles de concentración, temperatura y velocidad de reacción cambia. A escala macroscópica, los reactivos fluyen mayoritariamente de forma axial a través de canales internos del monolito. Sin embargo, a escala mesoscópica se presenta transporte radial de reactivos hasta la capa límite hidrodinámica adherida al catalizador sólido. Desde el gas, existe transferencia de masa de los reactivos hasta la superficie del catalizador, donde se adsorben sobre los sitios activos del catalizador. Tras esto, se da la reacción y luego los productos desorben primero a la capa límite y tras eso existe transferencia de masa de esos productos al bulto del gas. Los productos del proceso como un todo son: hidrógeno (H_2), acetaldehído (C_2H_4O), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) (García, 2012).

Esta hipótesis se cumple en toda la trayectoria (las tres etapas) de los fluidos en el canal. Para plantear el modelo se consideran n rodajas o cortes transversales del reactor, las que consideradas en serie conforman todo el reactor. El fenómeno se modela en escala macroscópica, ya que cada rodaja al interior de un canal del reactor (sección transversal del reactor según el modelo PFR) conserva un orden de magnitud macroscópico (unos cuantos milímetros). La partición en rodajas hace que se tenga un modelo de parámetros distribuidos, es decir, cada rodaja tiene sus propios parámetros. Sin embargo, se asume agitación perfecta en cada partición, por lo que en cada una los parámetros son concentrados (*lumped parameters*). Los supuestos que complementan esta hipótesis de modelado son:

- El perfil radial de velocidad (flujo en bulto de la fase) se desarrolla en una longitud tan corta desde la entrada al canal,

que resulta despreciable en comparación con el trayecto total de flujo.

- Por la igualdad dimensional de los canales, todos tienen un mismo comportamiento hidrodinámico.
- La conducción axial de calor en el sólido es despreciable debido a la alta conductividad del mismo.
- El fenómeno de flujo turbulento a través de cada rodaja implica que los cambios de concentraciones debido a las reacciones químicas sean homogéneos en todo el volumen de control, es decir, la concentración de cada compuesto al interior de cada rodaja es homogéneo.
- La presión al interior del reactor es uniforme y constante, debido a la longitud pequeña del mismo.
- No hay acumulación de sustancias en ninguna de las particiones, ni en la capa límite gas-superficie del catalizador.

2.3 Definición de los Sistemas de Proceso

El reactor monolítico de reformado de bioetanol tiene etapas físicas diferenciadas: tres secciones con diferentes catalizadores depositados en la pared interior del canal. Eso sugiere una partición inmediata en tres sistemas de proceso. Pero como el modelo hace el seguimiento de las variables durante todo el recorrido de la sustancia por el reactor, se realizan particiones virtuales más finas en el sentido axial. En cada una de esas particiones virtuales se consideran dos sistemas de proceso que incluyen todas las fases involucradas. En la Figura 1, se muestran las corrientes de entrada y salida al canal del reactor, así como los dos sistemas de proceso. Eso se ilustra para dos particiones contiguas $i - 1$ e i , en la etapa intermedia, aclarando que se toma el mismo tipo de particiones para las otras dos etapas.

Los dos sistemas de proceso que se consideran para la construcción del modelo son los siguientes:

- **Sistema de proceso I (SdeP I).** Está formado por el sólido y volumen de gas en los poros del catalizador. El sólido es todo el material cerámico del que está compuesto el monolito. El gas es el que ocupa los espacios vacíos en el catalizador depositado sobre la cara interna de cada canal. Es en estos poros del catalizador adherido en la cara interna del canal, donde ocurren las reacciones químicas. Como esa masa de gas es despreciable comparada con la masa del sólido, se asume que todo el intercambio de calor se da solo con el sólido. Esto implica que el gas contenido en este SdeP I está a la misma temperatura que el sólido, puesto que alcanza instantáneamente el equilibrio térmico con el sólido.
- **Sistema de proceso II (SdeP II).** Lo forma la fase gaseosa del flujo en bulto del reactor o corriente principal de gas que viaja por el canal. Esta fase muestra el flujo continuo de materia entre la entrada y la salida total del reactor. En ella cambian las composiciones de los compuestos a medida que ocurren las reacciones químicas en el SdeP I, meditante la transferencia de masa de reactivos a la superficie del catalizador y de productos desde esa superficie al bulto del gas.

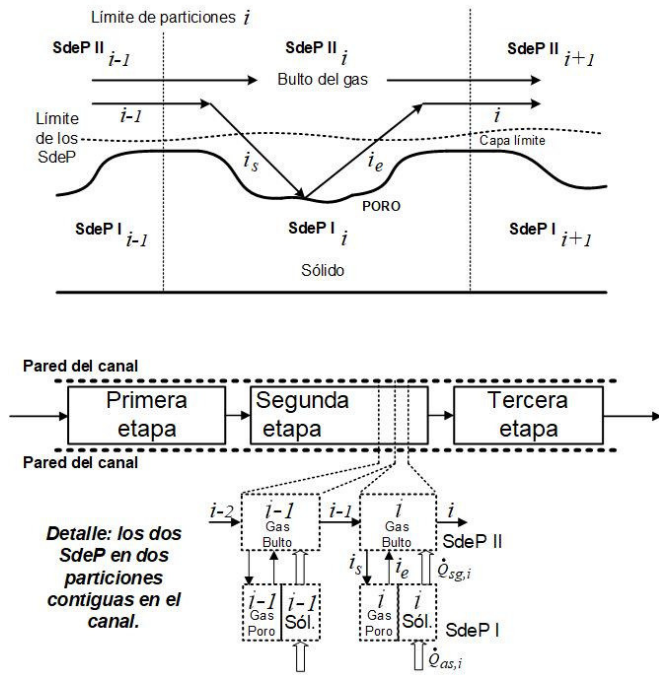


Figura 1. Sistemas de proceso tomados para el desarrollo del modelo. Las flechas gruesas indican intercambio de energía y las flechas delgadas corresponden a flujos de masa

3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Este es el segundo bloque del método para obtener un MSBF. En este bloque se obtienen las ecuaciones del modelo.

3.1 Aplicación de principio de conservación

El principio de conservación es la base fenomenológica de los MSBF. Para aplicar dicho principio a todos los sistemas de proceso declarados, se recuerda que en cada rodaja i existen cuatro flujos, dos en bulto: $i-1$ de entrada desde la partición o rodaja $i-1$ y el flujo i de salida de la rodaja i , y dos mesoscópico por transferencia de masa: i_s de reactivos del bulto del gas al poro en el catalizador (SdeP I) y el flujo i_e de productos de reacción desde el poro del sólido al gas.

3.1.1 Sistema de Proceso I: sólido y gas en poros

En este SdeP, ocurren las tres reacciones propias de cada etapa del reactor monolítico. La corriente de entrada i_s lleva los reactivos desde el bulto del gas hasta el volumen de gas en los poros de la superficie del catalizador. Los productos resultantes de la reacción son devueltos por la corriente i_e al bulto del gas. Ese mecanismo se observa en la Figura 1. Los balances en este SdeP I son como siguen.

Balance de masa total:

Este balance (Ecuación (2)) se hace sobre el gas contenido en los poros, pues la masa del sólido que forma el monolito no cambia.

$$\frac{dN_{G,I}}{dt} = \dot{n}_{i_s} - \dot{n}_{i_e} + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^3 \sigma_{j,k} r_k \quad (2)$$

donde: $N_{G,I}$ son las moles totales de gas en el SdeP I, $\dot{n}_{T,i_s}$ y $\dot{n}_{T,i_e}$ son el flujo que viene del bulto del gas y el flujo que retorna a dicho bulto del gas, respectivamente. $\sigma_{j,k}$ es el coeficiente estequiométrico de la sustancia j (seis compuestos: etanol (et), agua (agua), acetaldehído (Acetal), hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO), en la reacción k y r_k es la velocidad de la reacción k .

Balance de masa por componente:

Estos balances dependen de la etapa del reactor analizada, puesto que en cada una de ellas existen diferentes compuestos y catalizadores involucrados. Considerando agitación perfecta en cada partición y con los coeficientes estequiométricos de cada sustancia en cada reacción balanceada, los balances se presentan en las Ecuaciones (3), (4), (5), (6), (7) y (8).

Etanol:

$$\frac{dy_{et,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{et,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{et,i_e} \dot{n}_{i_e} - r_1 - y_{et,i_s} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (3)$$

Agua:

$$\frac{dy_{agua,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{agua,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{agua,i_e} \dot{n}_{i_e} - r_2 - r_3 - y_{agua,i_e} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (4)$$

Hidrógeno:

$$\frac{dy_{H_2,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{H_2,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{H_2,i_e} \dot{n}_{i_e} + r_1 + 3r_2 + r_3 - y_{H_2,i_e} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (5)$$

Acetaldehído:

$$\frac{dy_{Acetal,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{Acetal,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{Acetal,i_e} \dot{n}_{i_e} + r_1 - r_2 - r_3 - y_{Acetal,i_e} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (6)$$

Dióxido de carbono:

$$\frac{dy_{CO_2,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{CO_2,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{CO_2,i_e} \dot{n}_{i_e} + r_3 - y_{CO_2,i_e} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (7)$$

Monóxido de carbono:

$$\frac{dy_{CO,i_e}}{dt} = \frac{1}{N_{G,I}} \left(y_{CO,i_s} \dot{n}_{i_s} - y_{CO,i_e} \dot{n}_{i_e} + 2r_2 - r_3 - y_{CO,i_e} \dot{N}_{G,I} \right) \quad (8)$$

En estas expresiones, y_{j,i_s} y y_{j,i_e} son las fracciones molares del compuesto j en la corriente que viene y retorna al gas en el bulto del reactor, respectivamente. r_k , con $k = 1, 2, 3$ es la velocidad de

la reacción en la que participa el compuesto j con el coeficiente estequiométrico que multiplica a r , que como ya se dijo, se toma desde las reacciones químicas balanceadas. $\dot{N}_{G,I}$ es el cambio en las moles del gas en el SdeP I, un parámetro que se calcula con el lado derecho del balance total de masa (Ecuación (2)).

Balance de energía

Este balance se debería hacer sobre el sólido y el gas contenido en los poros del catalizador, visto como un todo. Sin embargo, como se asume equilibrio térmico entre ese gas y el sólido, y además, la masa del gas contenido en los poros es insignificante comparado con la masa del sólido, el balance de energía se hace solo para el sólido S . Eso conlleva a no considerar entrada o salida de masa, puesto que la cantidad de gas que entra y sale a SdeP I es muy baja. Calculando la energía total como el producto de las moles totales N_S en SdeP I, la capacidad calorífica molar del sólido $\bar{C}_{P,S}$ y la temperatura del sólido T_S , se obtiene la Ecuación (9):

$$\frac{dT_S}{dt} = \left(\frac{1}{N_S \bar{C}_{P,S}} \right) \left(\sum_{k=1}^3 -r_k \Delta \bar{H}_{r_k} \Delta \bar{C}_p (T_S - T_{ref}) - \dot{Q}_{sg} + \dot{Q}_{as} \right) \quad (9)$$

siendo N_S las moles del sólido que forman la pared del canal, $\Delta \bar{H}_{r_k}$ el calor de la reacción, $\Delta \bar{C}_p$ la diferencia entre las capacidades caloríficas de productos y reactivos, T_{ref} es una temperatura de referencia que arbitrariamente se asigna como 298 K, $\dot{Q}_{sg}$ es el flujo de calor del sólido al gas y $\dot{Q}_{as}$ el flujo de calor de los alrededores del reactor al sólido.

3.1.2 Sistema de Proceso II: Fase gaseosa del bulto del gas

Este sistema de proceso contiene todo el gas que fluye por el canal del monolito. Los balances que se obtienen se muestran a continuación.

Balance de masa total:

Este balance de masa de masa (Ecuación (10)) se hace al interior de los poros del catalizador.

$$\frac{dN_{II}}{dt} = \dot{n}_{i-1} + \dot{n}_{ie} - \dot{n}_{is} - \dot{n}_i \quad (10)$$

Balance de masa por componente:

Se toma balance por componente para las mismas especies que en el SdeP I. De nuevo se aplica el supuesto de agitación perfecta en el SdeP, obteniendo los balances que se presentan en las Ecuaciones (11), (12), (13), (14), (15), (16).

Etanol:

$$\frac{dy_{et,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{et,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{et,ie} \dot{n}_{ie} - y_{et,is} \dot{n}_{is} - y_{et,i} \dot{n}_i - y_{et,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (11)$$

Agua:

$$\frac{dy_{agua,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{agua,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{agua,ie} \dot{n}_{ie} - y_{agua,is} \dot{n}_{is} - y_{agua,i} \dot{n}_i - y_{agua,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (12)$$

Hidrógeno:

$$\frac{dy_{H_2,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{H_2,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{H_2,ie} \dot{n}_{ie} - y_{H_2,is} \dot{n}_{is} - y_{H_2,i} \dot{n}_i - y_{H_2,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (13)$$

Acetaldehído:

$$\frac{dy_{Acetal,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{Acetal,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{Acetal,ie} \dot{n}_{ie} - y_{Acetal,is} \dot{n}_{is} - y_{Acetal,i} \dot{n}_i - y_{Acetal,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (14)$$

Dióxido de carbono:

$$\frac{dy_{CO_2,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{CO_2,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{CO_2,ie} \dot{n}_{ie} - y_{CO_2,is} \dot{n}_{is} - y_{CO_2,i} \dot{n}_i - y_{CO_2,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (15)$$

Monóxido de carbono:

$$\frac{dy_{CO,i}}{dt} = \frac{1}{N_{II}} \left(y_{CO,i-1} \dot{n}_{i-1} + y_{CO,ie} \dot{n}_{ie} - y_{CO,is} \dot{n}_{is} - y_{CO,i} \dot{n}_i - y_{CO,i} \dot{N}_{II} \right) \quad (16)$$

En estas expresiones, $\dot{N}_{II}$ es el cambio de las moles en el SdeP II, parámetro que se calcula con el lado derecho del balance total de masa que se presenta en la Ecuación (10)).

Balance de energía

Se procede de modo similar al SdeP I, haciendo la conversión entre la capacidad calorífica a volumen constante (típica para gases) y la capacidad calorífica molar a presión constante se usa para el bulto de gas. Además, se reemplaza la entalpía de las corrientes por una función de la capacidad calorífica y la diferencia de temperaturas respecto a una de referencia. De este modo, se llega a la Ecuación (17):

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{N_{II} \bar{C}_{P,G}} \left(\dot{n}_{i-1} \bar{C}_{P,i-1} (T_{i-1} - T_{Ref}) - \dot{n}_i \bar{C}_{P,i} (T_i - T_{Ref}) + \dot{Q}_{sg} \right) \quad (17)$$

en la que T_i es la temperatura del bulto del gas en la partición o rodaja i .

3.2 Determinación de la Estructura Básica del Modelo

La estructura básica del MSBF consiste en las Ecuaciones 2 a 17, ecuaciones que describen el proceso de reformado, mostrando la evolución temporal de las variables de interés: concentraciones de reactivos y productos, y temperaturas del sólido (y el gas en los poros) y del bulto del gas. Se recuerda que estas 16 ecuaciones se deben evaluar para cada una de las n particiones o rodajas que se toman sobre todo el reactor.

3.3 Determinación de variables, parámetros y constantes

Desde las ecuaciones de la estructura básica que se acaban de determinar, es inmediata la determinación de las variables, los parámetros estructurales y las constantes del modelo, como se describen a continuación:

Variables.

SdeP I: $N_{G,I,n}$, $y_{j,ie,n}$, $T_{S,n}$.

SdeP II: $N_{II,n}$, $y_{j,i,n}$, $T_{i,n}$.

Los índices son: $j = C_2H_5OH$, CH_3CHO , H_2 , H_2O , CO , CO_2 . k = deshidrogenación de etanol, reformado de acetaldehído y reacción de desplazamiento con vapor de agua. n número de particiones. Con esto, el total de variables es: $8n + 8n = 16n$.

Parámetros estructurales.

SdeP I: $\dot{n}_{is,n}$, $r_{k,n}$, $y_{j,is,n}$, $\dot{N}_{G,I,n}$, $\dot{Q}_{sg,n}$, $\dot{Q}_{as,n}$.

SdeP II: $\dot{n}_{is,n}$, $\dot{N}_{II,n}$, $y_{j,i,n}$, $\bar{C}_{P,i,n}$.

Estos parámetros son en total: $6n + 4n = 10n$

Constantes estructurales

SdeP I: N_S , $\bar{C}_{P,S}$, $\Delta \bar{H}_{r_k}$, A_M , L_c .

SdeP II: $\bar{C}_{P,G}$, T_{Ref} , R .

A_M es el área de transferencia de masa y L_c es la longitud característica del reactor. Las constantes son en total 8.

3.4 Ecuaciones constitutivas y de valoración

Para cada uno de los parámetros estructurales, se debe tener una ecuación constitutiva o de valoración que permite hallar su valor numérico (Perez et al., 2019). En la Tabla 2, se presentan estas ecuaciones. Es importante mencionar la relación entre las velocidades de transferencia de masa y de reacción química. Cuando la velocidad de la reacción química es mayor que la velocidad de transferencia de masa, se dice que la etapa limitante del proceso es el movimiento de las moléculas al sitio activo del catalizador (donde ocurre la reacción). La lentitud de la transferencia de masa se puede deber a: i) resistencia interna por la dificultad de las moléculas para viajar desde la superficie del catalizador al sitio activo y ii) resistencia externa por la baja difusividad en la capa

Tabla 2. Ecuaciones constitutivas y de valoración del modelo

Descripción y fuente	Expresión matemática
Número de Reynolds (Cengel, 2002)	$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu}$
Número de Schmidt (Cengel, 2002)	$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$
Número de Peclet (Green and Perry, 2019)	$Pe = \left(\frac{L_c}{16z} \right) Re \times Sc$
Correlación para número de Sherwood (Balakotaiah and Westh, 2002) para un microcanal en una configuración monolítica	$Sh = 2,92 + \left(1,4 \frac{Pe^{\frac{1}{2}}}{Sc^{\frac{1}{6}}} \right)$
Regla de mezcla	$\bar{X} = \sum_{i=1}^n y_i X_i$
Contenido de moles por rodaja	$N_{T,SdeP} = \frac{P_{rodaja} V_{rodaja}}{T_{rodaja} R}$
Volumen por rodaja (m)	$V_{rodaja} = (\pi r^2 L) 1000$
Flujo molar de transferencia de masa (Alvarez, 2017)	$\dot{n}_{T,is} = A_m K_y (y_i)$
Correlación para número de Sherwood (Green and Perry, 2019) para fluidos en canales cerrados	$Sh = \frac{K_y L_c}{C_i D_{a-b}}$
Coefficiente cinético de la reacción de deshidrogenación de etanol (García, 2012)	$k_1 = 84,86 \times e^{\left(\frac{-E_a}{RT_{rodaja}} \right)}$
Coefficiente cinético de la reacción de reformado de acetaldehído (García, 2012)	$k_2 = 150,3 \times e^{\left(\frac{-E_a}{RT_{rodaja}} \right)}$
Coefficiente cinético de la reacción de desplazamiento con vapor de agua (García, 2012)	$k_3 = 76,8 \times e^{\left(\frac{-E_a}{RT_{rodaja}} \right)}$
Flujo de calor por convección al interior de un canal (Cengel, 2002)	$\dot{Q} = U A_c (T_s - T_G)$
Flujo de calor por conducción entre particiones consecutivas (Cengel, 2002)	$\dot{Q} = k A_{cond} \frac{T_{s,i} - T_{s,i-1}}{\Delta x}$

límite que se forma sobre el catalizador. Siempre se considera que, por la turbulencia de la corriente de gas, la transferencia de masa de los reactivos y productos entre el bulto del gas y la capa límite es muy rápida. Por lo dicho, el modelo propuesto evalúa cuál es la etapa limitante del proceso de reformado, pues como se evidencia en la Figura 1, se da transferencia de masa en el transporte de reactivo hacia la interface y luego de productos al bulto de gas. La etapa limitante que se determine, es la que indica los flujos reales de masa de esas corrientes del proceso.

4. SOLUCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Esta es la parte final del modelado, según la metodología que se sigue para obtener modelos semifísicos de base fenomenológica (MSBF).

4.1 Grados de libertad del modelo

Del análisis del total de variables, parámetros estructurales y funcionales, se evidencia que el conteo de grados de libertad da cero, recordando que todo se evalúa para $n = 100$ particiones o rodajas. Esto porque se tienen $16n + 10n$ incógnitas entre variables y parámetros totales (estructurales y funcionales) y $16n$ ecuaciones de la estructura básica y $10n$ ecuaciones constitutivas y de valoración. Se evidencia que todos los parámetros estructurales se pueden determinar mediante ecuaciones constitutivas y de valoración, como lo muestra la Tabla 2. Con los grados de libertad en cero, se puede proceder a la formulación del modelo computacional, pues el modelo matemático ya es solucionable.

4.2 Modelo computacional

El modelo computacional que soluciona el sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas que forman la estructura total del modelo resuelve cada rodaja y su evolución temporal. El flujo de la información sigue el sentido físico del proceso, entre la entrada y la salida del reactor. Se usó el método numérico de Euler, debido a su sencillez e interpretabilidad, con un paso temporal de 0,01 segundos. Este paso resulta suficientemente pequeño para no inducir errores numéricos. El simulador se programó en Matlab®.

4.3 Validación del modelo

La validación del modelo se hizo con datos publicados para un reformador real en varios trabajos (García et al., 2009), (García et al., 2010) y (García, 2012). Los parámetros cinéticos se ajustaron para minimizar el error cuadrático entre la predicción del modelo y el dato real reportado, respetando los intervalos reportados para dichos valores. El valor de los parámetros finales del modelo para el reformador de etanol se presentan en la Tabla 3. Es importante remarcar que este modelo entrega la variación temporal de concentraciones y temperaturas, a diferencia de los modelos reportados en la literatura, que son de estado estacionario. En la sección siguiente se presentan con detalle los resultados de las simulaciones.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras tener identificados todos los parámetros del modelo, se procedió a resolverlos para el arranque del reactor, asumiendo que todo está lleno de etanol y agua, con fracciones molares iniciales de 0,14 y 0,86 respectivamente. A continuación se muestran los resultados de simulación, destacando que para usar los datos experimentales reportados para la validación del modelo, se mantuvo la temperatura constante para cada etapa así: 648 K para la etapa 1, 673 K para la segunda, y 633 K para la última. Se asume equilibrio térmico entre el monolito cerámico-catalizador y el gas contenido en los poros de este último.

Tabla 3. Parámetros de entrada al simulador

Parámetro	Valor	Descripción
$T_{s,1}$	648	Temperatura de la primera etapa del reactor [K]
$T_{s,2}$	673	Temperatura de la segunda etapa del reactor [K]
$T_{s,3}$	633	Temperatura de la tercera etapa del reactor [K]
$\dot{n}_{et,in}$	$1,34 \times 10^{-3}$	Flujo molar de entrada de etanol al reactor $\left[\frac{mol}{s}\right]$
$\dot{n}_{agua,in}$	$8,21 \times 10^{-3}$	Flujo molar de entrada de agua al reactor $\left[\frac{mol}{s}\right]$
L_1	0,45	Longitud de la primera etapa del reactor [m]
L_2	0,5	Longitud de la segunda etapa del reactor [m]
L_3	0,45	Longitud de la tercera etapa del reactor [m]
$m_{cat,i}$	0,2	Masa de catalizador contenida [g] en una partición i
$M_{s,i}$	10	Masa de monolito [g] contenida en una partición i
$e_{s,i}$	0,0145	Espesor [m] de una partición i
$l_{s,i}$	0,03	Dimensión interior [m] de un canal de una partición i

La Figura 2 muestra la evolución temporal de la fracción molar de hidrógeno (producto), en cada una de las 100 particiones del reactor. Se inicia con la ya mencionada condición de equilibrio: reactor lleno de etanol y agua, ambos como vapor. En la figura, las tonalidades de las curvas representan: primera etapa del reactor en las azules oscuras, la segunda etapa en azul claro y verde, y la tercera etapa en las amarillas y rojas. En la Figura (2), que representa a las curvas del hidrógeno, allí, los lugares donde se encuentran más separadas las curvas corresponden a cambios de etapa, puesto que cada una opera a diferente temperatura. Para mantener consistencia con los

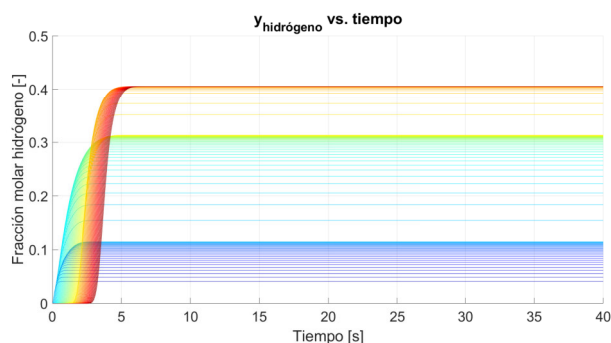


Figura 2. Resultados fracción molar de hidrógeno a las condiciones de la Tabla 3

datos experimentales disponibles, no se hizo transición suave de temperatura entre etapas. La diferencia entre las fracciones molares de equilibrio de etanol rodaja a rodaja, es relativamente constante en las etapas donde el etanol es reactivo. En cambio, se observa un agrupamiento alto en las últimas rodajas, donde el etanol pasa a ser un inerte en términos de la reactividad en la tercera etapa. Este comportamiento contrasta con el del reactivo (hidrógeno), para el cual se aprecian separaciones amplias entre las fracciones de equilibrio en varias rodajas. Tal separación se debe a que el hidrógeno está presente como producto en las tres etapas del reactor, con coeficientes estequiométricos distintos.

Para contrastar el desempeño del modelo con los datos experimentales, se define la conversión X_{etanol} y el rendimiento η_{H_2} de reacción. El primero indica el grado de cambio del reactivo límite y el segundo que tan eficiente es la producción del compuesto de interés, en este caso el hidrógeno.

$$X_{etanol} = 1 - \frac{\dot{n}_{etanol,Ent}}{\dot{n}_{etanol,Sal}} \quad y \quad \eta_{H_2} = \frac{\dot{n}_{H_2,Sal}}{6\dot{n}_{etanol,Ent}} \quad (18)$$

Con los subíndices *Ent* y *Sal* para indicar entrada y salida de una partición, los resultados obtenidos para estos dos índices a partir de la simulación del modelo propuesto fueron de $X_{etanol} = 92,22\%$ y de $\eta_{H_2} = 94,87\%$. Contrastando estos resultados con los datos presentados en García et al. (2009), que reportan valores de $X_{etanol} = 90,47\%$ y $\eta_{H_2} = 96,35\%$ respectivamente, se aprecia que para ambos valores la predicción del modelo tienen errores menores al 5%.

Una de las ventajas del modelo que se propone es que representa muy bien la situación de no equilibrio térmico entre la mezcla gaseosa y el monolito cerámico-catalizador. Eso permite simular el reformado de etanol en tres etapas con variación de temperaturas en la superficie del monolito-catalizador, con su efecto sobre la fase gaseosa. Eso implica la existencia de una acción de control, aquí tomada constante, que entrega calor desde el exterior del reactor. Para esto, los parámetros adicionales usados en el modelo son: i) coeficiente global de transferencia de calor entre el monolito y la mezcla gaseosa de $U = 1.000 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$ y ii) conductividad térmica de la fase sólida (monolito-catalizador) de $k = 0,8 \left[\frac{W}{m K} \right]$.

En la Figura 3, se muestra el efecto que ejerce el ingreso de más o menos calor, para mantener una temperatura diferente en cada etapa del reactor. Como se observa, se reduce la conversión de etanol, pues a la salida del reactor el etanol tiene una fracción molar superior a 0,06. Esto contrasta con lo evidenciado en el comportamiento adiabático pues la fracción final de etanol a la salida del reactor está por debajo de 0,01. Este efecto se debe principalmente a que la reacción de la primera etapa del reactor, donde se consume etanol, es endotérmica, y por tanto, al disminuir en este ensayo la temperatura de la etapa, se disminuye también la velocidad de reacción. Del mismo modo, este fenómeno explica la baja producción de hidrógeno evidenciada en la Figura 3, cuando se compara con los resultados de la Figura 2.

En la Figura 4, se muestra el comportamiento de las temperaturas de la interfase sólido-gas y del seno del gas, entre dos estados estacionarios en todo el reactor en operación adiabática. En esta condición, no entra ni sale calor del reactor. Por lo tanto, la energía requerida o liberada en cada etapa afectará la temperatura del sólido y del gas. Es importante denotar que estas curvas corresponden a los valores esperados para operación adiabática, recordando que las dos primeras etapas del reactor tienen reacciones endotérmicas, lo que hace que las temperaturas del sólido y de la mezcla gaseosa bajen drásticamente. Se destaca, además, la similitud en las dos respuestas, mostrando que el equilibrio térmico entre el gas y el sólido se alcanza muy rápido.

Para contrastar con la operación adiabática, en las Figuras 5 y 6, temperaturas, la concentración de reactivo y de producto, respectivamente, cuando se usa un flujo de calor constante desde el horno exterior al reactor de $\dot{Q}_h = 227 W$. Los cambios en los perfiles de concentración de los compuestos debido al efecto del flujo de calor proveniente del horno evidencian la necesidad de controlar una a una las etapas, puesto que la temperatura de cada una de ellas es crítica para lograr los objetivos del reactor como un todo. En los resultados se observa como la producción de hidrógeno y la conversión de etanol disminuyen al operar bajo la condición adiabática (sin entrada o salida de calor del exterior). Cuando se adiciona calor desde el horno exterior, las etapas con reacciones endotérmicas se ven favorecidas. En contraposición a esta estrategia se observa como las temperaturas de los sistemas de proceso SdeP I y SdeP II se inestabilizan y se alcanzan valores no deseados pues para estas condiciones existen reacciones secundarias, por lo cual, se evidencia la necesidad de un control de temperatura que mantenga al sistema en los rangos óptimos.

Finalmente, también se validó el modelo a partir de perfiles de concentración en estado estacionario en el reactor (García et al., 2010). Desde esos perfiles, se tomaron cuatro puntos a las distancias desde la entrada del reactor que se reportan en la Tabla 4. Se simuló el modelo propuesto en un tiempo suficiente para alcanzar el estado estacionario y leer las concentraciones en la partición que corresponde a las distancias mencionadas. Las tablas muestran como el modelo presenta un error muy bajo para la etapa de deshidrogenación del etanol, y errores bajos para las etapas de reformado de acetaldehído y desplazamiento con vapor de agua (Tabla 4). Se insiste en la imposibilidad de validar

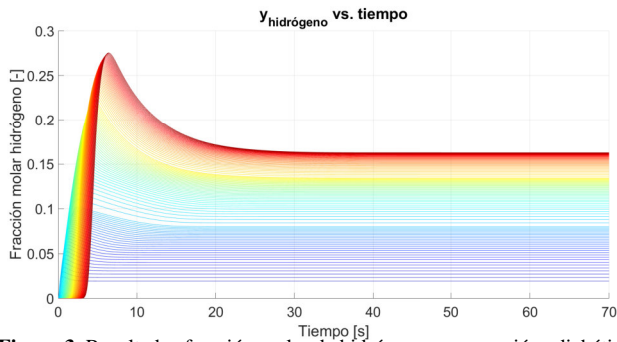


Figura 3. Resultados fracción molar de hidrógeno en operación adiabática

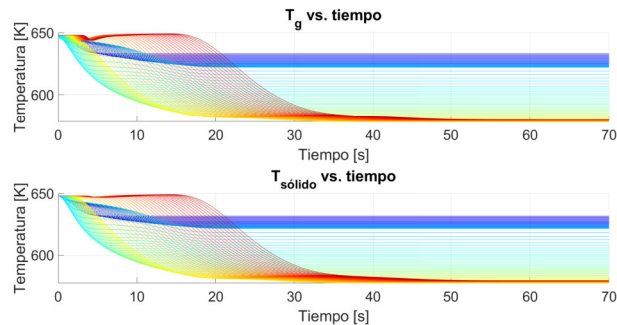


Figura 4. Dinámica de las temperaturas del sólido $T_{sólido}$ y de la fase gaseosa T_g en operación adiabática

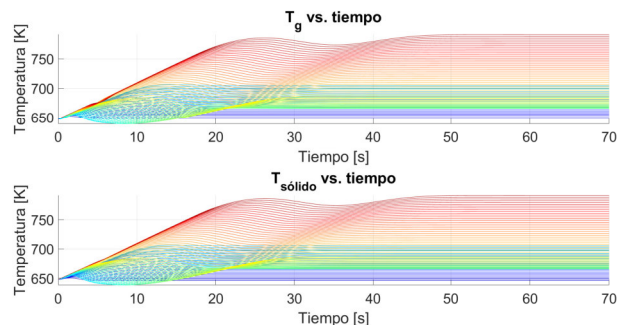


Figura 5. Dinámica de las temperaturas del sólido $T_{sólido}$ y de la fase gaseosa T_g en operación $\dot{Q}_h = 227 \text{ W}$.

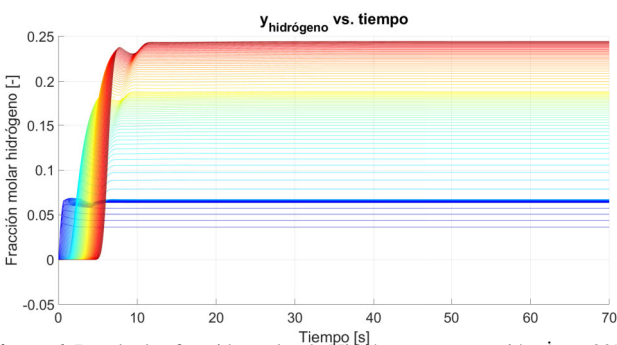


Figura 6. Resultados fracción molar de Hidrógeno en operación $\dot{Q}_h = 227 \text{ W}$

la respuesta dinámica, pues todo lo encontrado en la literatura son datos experimentales de estado estacionario. Sin embargo, el contrastar los valores en estado estacionario en diferentes puntos del reactor permite validar el modelo propuesto, puesto que bajo las mismas condiciones de operación, el modelo entrega valores similares de los flujos molares y temperatura al interior

Tabla 4. Comparación resultados Flujo molar de H_2 : Etapa de deshidrogenación de etanol

Longitud en el reactor	(García et al., 2010)	Modelo propuesto
Primera etapa del reactor		
0,135 [m]	$0,00082 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,00083 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,27 [m]	$0,0012 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0012 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,405 [m]	$0,0013 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0013 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,45 [m]	$0,0013 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0013 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
Segunda etapa del reactor		
0,6 [m]	$0,0032 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0031 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,75 [m]	$0,0043 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0037 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,9 [m]	$0,0048 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0041 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
0,95 [m]	$0,0049 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0042 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
Tercera etapa del reactor		
1,085 [m]	$0,0069 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0062 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
1,22 [m]	$0,0073 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0062 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
1,355 [m]	$0,0073 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0062 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$
1,4 [m]	$0,0073 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$	$0,0062 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right]$

del monolito en cada una de las etapas, respecto de los reportados en la literatura.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Del análisis de las simulaciones se evidencia que, al replicar las condiciones operativas reportadas en la literatura, el modelo predice correctamente el comportamiento dinámico de las fracciones molares de los compuestos involucrados en el proceso de reformado. Una ventaja del modelo propuesto es que está formado por ecuaciones diferenciales ordinarias, en vez de parciales, que resultan de los balances de masa y energía sobre los dos sistemas de proceso delimitados. Esto es una simplificación considerable en comparación con los modelos comúnmente usados para este proceso (pseudo homogéneos de segundo orden), reduciendo así el orden de complejidad del algoritmo para la solución del modelo y facilitando los análisis de sensibilidad de los parámetros estructurales y funcionales del mismo.

Los dos grandes aportes de este trabajo son la construcción de un modelo que tiene en cuenta las limitaciones por transporte de masa y por cinética de reacción que permite determinar las condiciones bajo las cuales la producción de un reactor monolítico puede ser las más adecuadas. Dicho modelo logra especificar si la limitación del proceso es la transferencia de masa o es la reacción química. Saber esto ayuda a implementar acciones de control más eficientes en el reactor: manipulando el flujo de gas o manipulando los flujos de calor. El segundo gran aporte es la capacidad de predecir todas las trayectorias temporales de las variables de interés para un reformador de etanol. Esto permite predecir con precisión, no solo la respuesta dinámica sino los estados estacionarios de este tipo de reactor, respetando la división inherente que marcan los tres tipos de catalizadores usados. Adicionalmente, su carácter dinámico lo hace muy útil para plantear estrategias de control basado en modelo, puesto que las simulaciones evidencian lo que la práctica con este tipo de reactores muestra: la necesidad de controlar cada etapa de forma independiente. Queda el reto de proponer estructuras de control que manejen de forma individual pero cooperativa, las tres entradas de calor: una por etapa.

6. REFERENCIAS

- Afolabi, A.-T. F., Kechagiopoulos, P. N., Liu, Y., and Li, C.-Z. (2021). Kinetic features of ethanol steam reforming and decomposition using a biochar-supported Ni catalyst. *Fuel Processing Technology*, 212.
- Akande, A., Aboudheir, A., Idem, R., and Dalai, A. (2006). Kinetic modeling of hydrogen production by the catalytic reforming of crude ethanol over a co-precipitated $\text{Ni} - \text{Al}_2\text{O}_3$ catalyst in a packed bed tubular reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(12):1707–1715.
- Alvarez, H. (2017). *Efectos dinámicos en operaciones unitarias*. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Balakotaiah, V. and Westh, D. H. (2002). Shape normalization and analysis of the mass transfer controlled regime in catalytic monoliths. *Chemical Engineering Science*, 57(8):1269–1286.
- Cengel, Y. A. (2002). *Heat transfer: a practical approach*. McGraw-Hill Companies, Inc, Boston, US, illustrated edition.
- Cifuentes, A., Torres, R., and Llorca, J. (2019). Modelling of the ethanol steam reforming over Rh-Pd/CeO_2 catalytic wall reactors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(49):26265–26273.
- Fogler, H. S. (2004). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, US, ilustrada edition.
- Francesconi, J. A. (2008). *Modelado, síntesis y optimización del proceso de reformado de bioetanol para la producción de hidrógeno grado PEM*. PhD thesis, Universidad Nacional del Litoral.
- García, V. M. (2012). *Modelado, análisis y control dinámico de un reformador de etanol en tres etapas para aplicaciones en pilas de combustible*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- García, V. M., Lopez, E., Serra, M., and Llorca, J. (2009). Dynamic modeling of a three-stage low-temperature ethanol reformer for fuel cell application. *Journal of Power Sources*, 192(1):208–215.
- García, V. M., Lopez, E., Serra, M., Llorca, J., and Riera, J. (2010). Dynamic modeling and controllability analysis of an ethanol reformer for fuel cell application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(18):9768–9775.
- Green, D. and Perry, R. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill Companies, Inc, US.
- Perez, L. L., Tirado, J. G., Montano, C. B., and Alvarez, H. (2019). Phenomenological-based model of human stomach and its role in glucose metabolism. *Journal of Theoretical Biology*, 460:88–100.
- Sierra, M., Ocampo-Martínez, C., Li, M., and Llorca, J. (2017). Model predictive control for ethanol steam reformers with membrane separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4):1949–1961.

BIOGRAFÍAS



Simón Gómez Giraldo, nacido el 14 de diciembre de 1997 en Envigado, Antioquia. Actualmente cursando el último semestre de Ingeniería Química en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. En 2019, ingresó al grupo de investigación de Modelamiento de sistemas dinámicos KALMAN de la Facultad de Minas, con gran interés en la adquisición de conocimiento y en el uso de este para el aprovechamiento de oportunidades, tanto en la academia como en la industria. Actualmente, se desempeña como monitor de la asignatura Termodinámica General perteneciente al Departamento de Procesos y Energía de la Facultad de Minas. Es una persona dinámica, activa y con un deseo constante por aprender y compartir conocimientos.



David González Jiménez, nació en la ciudad de Medellín, Colombia el 26 de Noviembre de 1997. Ingeniero Químico y estudiante de ingeniería de sistemas e informática de la facultad de minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Desde el 2019 hasta el 2020 formó parte del grupo de investigación de Modelamiento de

sistemas dinámicos KALMAN del departamento de procesos y energía de la facultad de minas de la universidad. Actualmente se desempeña como estudiante auxiliar de la asignatura física mecánica de la dirección académica de la universidad.



Hernán Álvarez, se graduó como Ingeniero Químico y obtuvo el título de Magister en Ingeniería de Sistemas, en la Universidad Nacional de Colombia. Luego recibió el grado de Doctor en Ingeniería de Sistemas de Control del Instituto de Automática (INAUT), en la UNSJ, Argentina. Es Profesor Titular del Departamento de Procesos y Energía de la Facultad de Minas, Universidad Nacional

de Colombia. Su área de trabajo es el modelado y control de Procesos Dinámicos. Es investigador co-fundador del Grupo de Investigación en Procesos Dinámicos KALMAN.

Modelación Numérica Tridimensional del Medidor de Caudal Palmer-Bowlus Aplicando el Programa FLOW-3D

Toapaxi-Alvarez, Jorge^{1,*} ; Silva-Bastidas, Roberto¹ ; Torres-Jacobowitz, Cristina¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: El medidor de caudal Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936, como una adaptación del medidor Venturi para uso en alcantarillado, debido a la dificultad en la modificación de la solera de la tubería. Existen medidores Palmer-Bowlus a la venta en el sector comercial de un solo cuerpo con su respectiva curva de descarga, cuya adquisición incrementa el costo de los proyectos de alcantarillado. Con base en el modelo físico del medidor Palmer-Bowlus (Torres & Vásquez, 2010), esta investigación tuvo como objetivo realizar la modelación numérica tridimensional de estos medidores, considerando cuatro diámetros de tubería: 160 mm, 200 mm, 250 mm y 400 mm; los diámetros seleccionados son los de mayor uso, de acuerdo con la información provista por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). Las curvas de descarga fueron calibradas y validadas mediante el programa FLOW-3D. El mallado tuvo gran influencia en la calidad de los resultados y en la duración de la simulación numérica; al contrario, la rugosidad y los modelos de turbulencia (RNG y k-e) tuvieron poca influencia. Las curvas de descarga obtenidas en la modelación numérica tienen buena aproximación a las obtenidas en el modelo físico.

Palabras clave: Alcantarillado, Palmer-Bowlus, medidor de caudal, CFD, FLOW-3D.

Three-Dimensional Numerical Modeling of the Palmer-Bowlus Measuring Flume Applying the FLOW-3D Software

Abstract: The Palmer-Bowlus flume was developed in 1936, as an adaptation of the Venturi flume for the use in sewer systems, due to the difficulty in modifying the pipe invert. There are commercially available single-body Palmer-Bowlus flume with their respective discharge curves, which increase the cost of sewer projects. Based on the physical model of the Palmer-Bowlus flume (Torres & Vásquez, 2010), the aim of this research was to carry out the three-dimensional numerical modeling of these flow meters, considering four pipe diameters: 160 mm, 200 mm, 250 mm and 400 mm; the selected diameters are the most used ones, according to the information provided by the Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS). The discharge curves were calibrated and validated using the FLOW-3D program. Meshing had a great influence on the quality results and duration of the numerical simulation; in contrast, the roughness and turbulence models (RNG y k-e) had little influence. The discharge curves obtained in the numerical modeling have good approximation to those obtained in the physical model.

Keywords: Sewer, Palmer-Bowlus, flow meter, CFD, FLOW-3D.

1. INTRODUCCIÓN

El medidor Palmer-Bowlus fue desarrollado en 1936 y es una adaptación del medidor Venturi para uso en alcantarillado, la diferencia entre éste y el medidor Venturi es que el medidor Palmer-Bowlus no requiere de la caída en el perfil longitudinal, por lo que puede ser instalado en alcantarillados existentes donde se dificulte la modificación de sus soleras (Ludwig & Ludwig, 1951). En el trabajo mencionando anteriormente se presenta el procedimiento para el cálculo de este tipo de medidores, que consta de tres partes:

- Selección de la forma del medidor y sus proporciones.
- Obtención de los puntos caudal (Q) vs calado (H_o).
- Creación de la curva de descarga.

En el primer paso, se determina las dimensiones fundamentales del medidor, tomando en cuenta los factores que controlan el diseño, que en general son: el calado y la velocidad del flujo.

En el segundo paso, para la obtención de los puntos Q vs H_o se utiliza un método de prueba y error simplificado, empleando una ayuda gráfica.

*jorge.toapaxi@epn.edu.ec
Recibido: 20/08/2019
Aceptado: 04/01/2022
Publicado: 01/02/2022
10.33333/rp.vol49n1.04
CC 4.0

En el paso final, la creación de la curva de descarga resulta de obtener de los puntos descritos en el paso anterior, mediante la técnica semigráfica simple, que consiste en ir graficando los puntos Q vs H_o de cada evento, hasta obtener suficientes puntos para realizar el trazado de la curva y la obtención de la ecuación característica.

El paquete informático FLOW-3D v11.2 es un programa de propósito general de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por las siglas de *Computational Fluid Dynamics*). El programa emplea técnicas numéricas especializadas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos, que permite obtener: transientes, soluciones en tres dimensiones que presentan gran variación de los parámetros en el espacio o tiempo (multi-escala) y problemas de flujo multi-físicos (Flow Science, Inc., 2016).

En el estudio de Torres & Vásquez (2010), se construyó un medidor Palmer-Bowlus de 33 cm de diámetro y se obtuvo la curva de descarga experimental, para caudales entre 3.7 l/s y 40.18 l/s. Con ese antecedente, en el presente análisis se estableció las curvas de descarga del medidor Palmer-Bowlus, mediante la modelación CFD para cuatro diámetros de tuberías comerciales (160 mm, 200 mm, 250 mm y 400 mm). Para lo cual, se calibró el modelo numérico con la curva de descarga experimental del medidor de 33 cm de diámetro. Una vez calibrado y validado el modelo, se realizó las modelaciones de los cuatro diámetros de tuberías comerciales para obtener las curvas de descarga, que pueden ser fácilmente utilizadas en la práctica diaria.

En este sentido, se planteó los siguientes objetivos específicos:

- Construir y calibrar el modelo tridimensional, utilizando el programa FLOW-3D, en función del modelo físico realizado por Torres & Vásquez (2010).
- Analizar mediante un estudio de sensibilidad de parámetros: el tiempo de modelación, el tipo de modelo de turbulencia, el tamaño del mallado y la rugosidad.
- Obtener las curvas de descarga para los cuatro medidores Palmer-Bowlus, considerando tuberías de diámetro iguales a: 16 cm, 20 cm, 25 cm y 40 cm.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Medidores de Caudales

Según Chow (2004), en una sección crítica de control la relación entre la profundidad y el caudal es única, no depende de la rugosidad del canal, ni de otras circunstancias no controlables; es decir, la relación profundidad respecto al caudal es la base teórica para la medición en canales abiertos.

A lo largo de los años, se han desarrollado varias estructuras para la medición del flujo, donde se obtiene la profundidad crítica con la ayuda de la construcción de una elevación en la solera del canal, generalmente pequeña. En este campo se distinguen los vertederos por ser de fácil construcción, sin embargo, generan pérdidas considerables. Los vertederos pueden ser de varias formas, definidos por el perímetro mojado

y su forma, tales como: vertederos rectangulares, trapeziales, triangulares, de pared delgada, de pared gruesa, de forma redondeada, entre otros (Domínguez, 1999).

Otra desventaja de los vertederos es que, al cerrar completamente el canal, producen un embalsamiento aguas arriba de la estructura; si a esto le sumamos la presencia de partículas, estas se depositan en el embalse cambiando paulatinamente el coeficiente de descarga.

Para solventar este problema, al menos parcialmente, se popularizó el uso de medidores de flujo crítico (Chow, 2004), conocido como medidor tipo Venturi. Este usualmente opera en condición no sumergida, con la profundidad crítica en la sección contraída y un resalto hidráulico en la sección de salida.

Otra estructura ampliamente utilizada es el medidor tipo Parshall, el cual, debido a su contracción, aumenta la velocidad del flujo, lo que imposibilita que las partículas se sedimenten; es decir, cualquier partícula de arena o de limo puede ser arrastrada fuera de su estructura. Sin embargo, si existe una carga considerable de materiales, el medidor padecerá de los mismos inconvenientes que los vertederos, debido a la sedimentación sus resultados no serán confiables. Para solventar este problema se desarrolló el medidor San Dimas, que tiene un mecanismo auto limpiante para flujos altamente cargados de materiales, no obstante, esta estructura tiene algunas desventajas: no puede usarse combinada con una compuerta aguas arriba, su geometría encarece su construcción y requiere de una mano de obra más especializada que otros medidores (vertederos).

Con esos antecedentes, con base en el medidor Venturi se originó el medidor Palmer-Bowlus (1936), que se diferencia por no disponer de la caída en el perfil longitudinal, lo cual representa una ventaja en su adaptación a redes existentes. Sin embargo, el medidor Palmer-Bowlus desarrollado por Ludwig & Ludwig (1951) tiene una geometría predeterminada, que de ser modificada, imposibilita el uso de sus ecuaciones.

Torres & Vásquez (2010) partieron del mismo enfoque que Ludwig & Ludwig (1951) y definieron las ecuaciones para el cálculo del caudal tomando en cuenta el cambio de la geometría, con lo cual se obtuvo los caudales para distintos tipos del medidor Palmer-Bowlus. La ecuación obtenida en ese estudio, que está basada en el análisis dimensional, para cualquier medidor Palmer – Bowlus es la siguiente:

$$Q = H_o^{\frac{5}{2}} g^{\frac{1}{2}} f_1 \left(\frac{D}{H_o} \right) \quad (1)$$

Donde:

h_o es el calado en la zona de medición (m); g es la gravedad igual a $9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right)$; $f_1 \left(\frac{D}{H_o} \right)$ representa al coeficiente de descarga; D es el diámetro de la tubería.

Así mismo, como resultado de ese estudio se obtuvo una ecuación para cualquier medidor Palmer-Bowlus con un rango de caudales entre 0 (l/s) y 2223 (l/s):

$$\frac{Q}{H_0^{5/2} g^{1/2}} = -0.0358 \left(\frac{D}{H_0} \right) + 0.4743 \quad (2)$$

El esquema de un medidor Palmer-Bowlus con sus dimensiones características se muestra en la Figura 1.

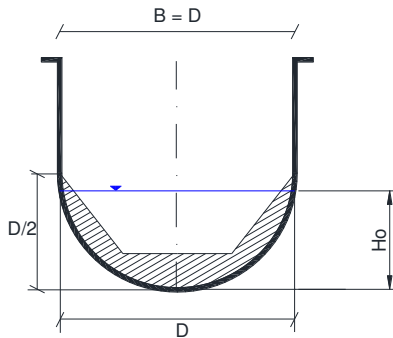


Figura 1. Parámetros del medidor Palmer-Bowlus

2.2 Modelación Hidráulica (CFD)

Las técnicas numéricas en ingeniería han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, siendo concretamente la Mecánica de Fluidos una de las disciplinas científicas donde este auge ha tenido mayor repercusión (Fernández, 2012). El campo de la hidráulica ya ha incursionado en las simulaciones CFD, como una herramienta complementaria de los laboratorios, en donde los fenómenos son representados a escala con un costo elevado. El análisis CFD ayuda a la toma de decisiones, y en gran medida a la reducción de costos en etapas de diseño y verificación (Aulestia, 2017).

El costo de un experimento, en términos del alquiler del laboratorio y/o salarios, es proporcional al número de puntos de datos y al número de configuraciones a ensayar en un modelo físico; a diferencia de la modelación CFD, que puede generar volúmenes extremadamente grandes de resultados a un costo aproximadamente igual, además de la realización de estudios de rendimiento paramétrico, entendidos como, el análisis del impacto de los diferentes parámetros, en el resultado y tiempo de la modelación (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Por lo tanto, la optimización de las estructuras hidráulicas debe ser tal que, no solo los resultados obtenidos sean confiables, sino también, que los tiempos de modelación sean razonables. En el campo de la dinámica de fluidos computacional, ha existido un gran avance en la resolución de las ecuaciones que gobiernan a los fluidos, mediante el uso de modelos numéricos que pueden, con cierto grado de aproximación, entregar resultados confiables del funcionamiento hidráulico de estructuras complejas (Aulestia, 2017). En la actualidad, en el estudio de los problemas hidráulicos se aplica la modelación CFD, con base en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

2.3 Modelo FLOW-3D

A pesar que en el siglo XX las técnicas numéricas podían aproximarse a la solución de las ecuaciones complejas de Navier – Stokes, los ordenadores tenían poca capacidad hasta mediados de ese siglo. Sin embargo, en ese periodo debido al

avance en el procesamiento computacional, se impulsó las técnicas CFD. Así, en 1985 se constituyó el laboratorio nacional de los Álamos (LANL) y la comercialización del programa FLOW-3D para la modelación de flujos a superficie libre.

El programa resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds – Navier Stokes (RANS), al igual que los algoritmos FAVOR y VOF, para el contorno sólido y el seguimiento de la superficie libre, respectivamente. Para alcanzar la solución, este programa emplea el método de diferencias finitas. La presión está integrada en la ecuación de cantidad de movimiento y la velocidad está presente en la ecuación de continuidad; las cuales se solucionan a partir de un proceso iterativo. Para el efecto, el programa cuenta con tres fases principales:

- Pre proceso: Ingreso de datos, principios físicos.
- Proceso o solucionador: modelo matemático, solución numérica.
- Post proceso: resultados (figuras, tablas).

2.4 Ecuaciones de Movimiento del Fluido

El programa FLOW-3D tiene como base de solución las siguientes ecuaciones:

2.4.1 Ecuación de Continuidad

La ecuación general de continuidad de masa se describe a continuación:

$$V_F \frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u A_x) + R \frac{\delta}{\delta y} (\rho v A_y) + \frac{\delta}{\delta z} (\rho \omega A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (3)$$

Donde:

V_F es la fracción de volumen abierto para flujo; ρ es la densidad del fluido; R_{DIF} término de la difusión turbulenta; R_{SOR} fuente de masa.

Al usar el sistema de coordenadas cartesianas los términos $R = 1$, $\xi = 0$.

Los componentes de velocidad u, v, w se encuentran en la dirección de las coordenadas x, y, z . La fracción de área abierta para el flujo en la dirección x, y, z se representa mediante A_x, A_y, A_z .

2.4.2 Ecuación de Cantidad de Movimiento

Las ecuaciones de Navier – Stokes para las componentes de velocidad en las tres direcciones (u, v, w), se presentan a continuación:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta u}{\delta x} + v A_y \frac{\delta u}{\delta y} + w A_z \frac{\delta u}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - \delta u_s) \quad (4)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta v}{\delta x} + v A_y \frac{\delta v}{\delta y} + w A_z \frac{\delta v}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - \delta v_s) \quad (5)$$

$$\frac{\delta w}{dt} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta w}{\delta x} + v A_y \frac{\delta w}{\delta y} + w A_z \frac{\delta w}{\delta z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \rho}{\delta z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - \delta w_s) \quad (6)$$

Donde:

G_x, G_y, G_z son las aceleraciones del cuerpo; f_x, f_y, f_z son las aceleraciones viscosas; $u_s, v_s, w_s = U_s$ es la velocidad del fluido en la superficie del medio, con respecto al mismo medio y es calculado para cada volumen de control, de la siguiente forma:

$$U_s = \frac{dQ}{\rho_Q dA} n \quad (7)$$

Donde:

dQ equivale al caudal másico; ρ_Q densidad del medio fluido; dA es el área de la superficie del medio en la celda; n es la normal exterior a la superficie.

2.5 Modelos de Turbulencia

Los modelos de turbulencia fueron concebidos para resolver el problema de cierre que tienen las ecuaciones de Reynolds al utilizar los valores medios, añadiendo el término de tensiones turbulentas, que supone añadir más variables al sistema original de ecuaciones (Recasens, 2014). Como consecuencia, los programas CFD como el FLOW-3D, tienen como finalidad la determinación del valor de la viscosidad turbulenta.

La turbulencia se expresa como un movimiento caótico y no estable de los fluidos, que ocurre cuando no existen suficientes fuerzas viscosas estabilizadoras.

$$k_T = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (8)$$

Donde las componentes u', v', w' son las componentes de la velocidad del fluido asociado con las fluctuaciones turbulentas caóticas.

$$\frac{\delta k_T}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta k_T}{\delta x} + v A_y \frac{\delta k_T}{\delta y} + w A_z \frac{\delta k_T}{\delta z} \right\} = P_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad (9)$$

En la actualidad, se utiliza un modelo más sofisticado, que consiste en el uso de dos ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k_t y su disipación ε_T , este modelo lleva el nombre de modelo $k - \varepsilon$.

$$\frac{\delta \varepsilon_T}{\delta t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta x} + v A_y \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta y} + w A_z \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta z} \right\} = \frac{1.44 \varepsilon_T}{k_T} (P_T) + Diff_{\varepsilon} - 1.92 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (10)$$

El término difusión de la disipación se expresa como:

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\delta}{\delta x} \left(v_{\varepsilon} A_x \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(v_{\varepsilon} A_y \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(v_{\varepsilon} A_z \frac{\delta \varepsilon_T}{\delta z} \right) \right\} \quad (11)$$

Otro modelo de turbulencia es el basado en el método del grupo de renormalización (RNG), este acercamiento aplica métodos estadísticos para la derivación del promedio de las ecuaciones. El modelo RNG usa ecuaciones similares a las del modelo $k - \varepsilon$, sin embargo, las constantes encontradas empíricamente para el modelo $k - \varepsilon$, son derivadas explícitamente en el modelo RNG (Flow Science, Inc., 2016). En general, el modelo describe de mejor manera los flujos con intensidad turbulenta baja. Las constantes del modelo son 1.42 en lugar de 1.44; y la segunda constante se calcula de la energía cinética turbulenta (k_T) y la producción turbulenta (P_T).

3. METODOLOGÍA

Para obtener las curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus, se calibró el modelo tridimensional utilizando los datos obtenidos de la modelación física del medidor Palmer-Bowlus D=33 cm ($Q=22.047$ l/s). Calibrado el modelo, se validó la configuración con los once ensayos restantes reportados en la modelación física.

Una vez establecido el procedimiento, se obtuvo las curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus para diferentes diámetros.

Para realizar las corridas se utilizó un Computador AMD RYZEN 7 1700 (16 núcleos trabajando a 3.9 Ghz todo el tiempo), 32 Gb de RAM con una velocidad de 3000 Mhz y un disco duro de capacidad igual a 2 TB para poder almacenar los archivos de resultados. Para la creación del modelo geométrico se utilizó el programa CATIA V5 y para la realización de la modelación numérica se aplicó el programa FLOW-3D.

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo de la metodología empleada en la modelación tridimensional del medidor Palmer-Bowlus.

4. CALIBRACIÓN Y SENSIBILIDAD

Para calibrar el modelo se trabajó con el ensayo N.7, que tiene un caudal de $22.047 \left(\frac{l}{s}\right)$. Se escoge este caudal para realizar la calibración, debido a que se acerca al promedio igual a $20.634 \left(\frac{l}{s}\right)$; al igual que, si consideramos solo los valores extremos, con los ensayos N.1 y N.12, $\frac{Q_{min} + Q_{max}}{2} = 21.931 \left(\frac{l}{s}\right)$.

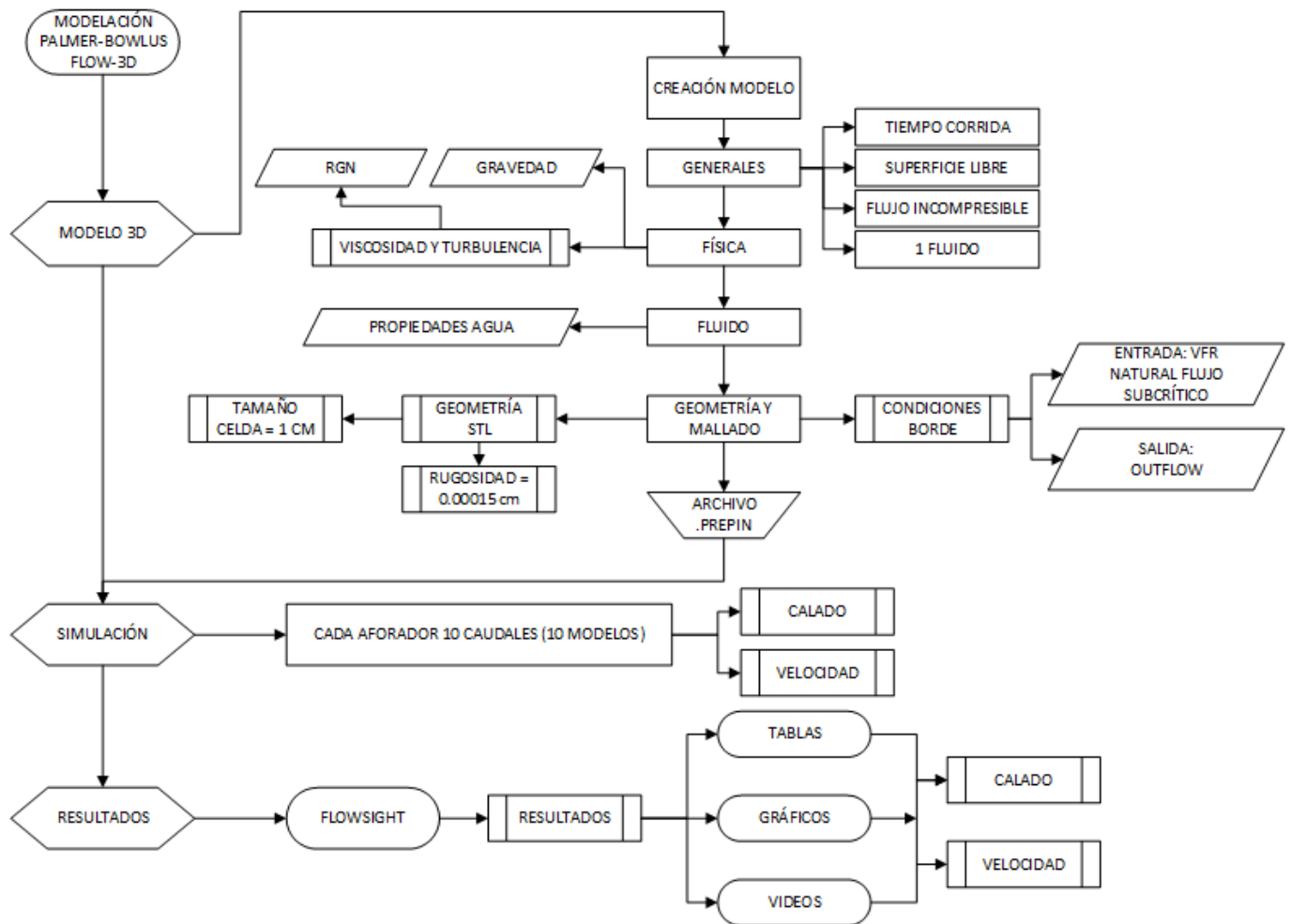


Figura 2. Diagrama de flujo de la modelación del medidor Palmer-Bowlus en FLOW-3D

Las condiciones de borde utilizadas en el modelo fueron las siguientes:

- En X (Dirección del flujo): mínimo (Vfr, “Q”), entrada libre; máximo (salida, “O”)
- En Y (Dirección transversal): mínimo (sólido, “S”); máximo (sólido, “S”)
- En Z (Dirección de la gravedad): mínimo (sólido, “S”); máximo (presión, “P”), fracción de fluido igual a cero

Se analizó la sensibilidad del modelo tomando en cuenta los diferentes tamaños de malla (0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm y 2.0 cm). Al considerar una malla superior a 1.0 cm, la geometría del medidor no era representada adecuadamente.

Por lo que se descartaron tamaños superiores a 1.0 cm y se analizó la influencia del tamaño de malla en función de los resultados de calado y tiempo de ejecución del modelo; determinando que es adecuado y óptimo realizar el modelo con un tamaño de celda de 1 cm ($H_o = 20.098$ cm, $T = 1$ h), en vez del modelo con 0.5 cm de tamaño de celda ($H_o = 20.038$ cm, $T = 14$ h).

El tiempo total de modelación fue estudiado en un escenario conformando por 1'109.662,00 elementos (celda de 1 cm),

con el que se determinó el tiempo de modelación óptimo en 30 segundos, Tabla 1.

Tabla 1. Incidencia del tiempo de modelación

Tiempo (s)	Ho (cm)		Variación (%)
	M. Numérico	M. Físico	
22.90	20.036	19.627	2.084
30.00	20.038	19.627	2.094
30.90	20.038	19.627	2.094
34.90	20.038	19.627	2.094
39.00	20.038	19.627	2.094

Con base en el ensayo N.7, en la Figura 3 se muestra el perfil longitudinal del modelo numérico calibrado.

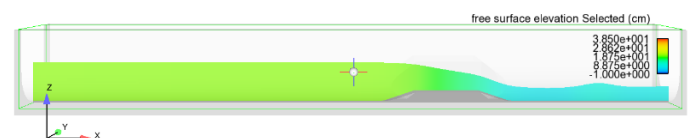


Figura 3. Captura de pantalla del modelo numérico $Q=22.047 \left(\frac{l}{s}\right)$, $H_o=20.038$ cm

Referente al análisis de sensibilidad, para el escenario con $Q = 22.047$ l/s, se examinó los distintos modelos de turbulencia que contiene el programa; encontrando que, el

modelo RNG ($H_o = 20.038$ cm) y k-e ($H_o = 20.032$ cm) tienen resultados muy próximos. En el caso más crítico la diferencia entre sí es de 0.16 %; por lo tanto, se escogió el modelo RNG, recomendado en estudios similares (Casa, 2016).

Continuando con el análisis de sensibilidad, se estudió la rugosidad absoluta y su influencia en el modelo, determinando que esta variable no ejerce mayor influencia en la modelación. En consecuencia, se utilizó la rugosidad de 0.0015 mm, recomendada en la bibliografía (Sotelo, 1997).

5. VALIDACIÓN

El proceso de validación tiene como objetivo verificar la adecuada representación del fenómeno considerando un rango de caudales. Al respecto, se comparó los resultados obtenidos en el modelo numérico con los once resultados procedentes del modelo físico y se comparó los resultados de los dos métodos, Tabla 2. En el modelo numérico se consideró: Un medidor con $D = 33$ cm, un tamaño de malla de 1 cm, modelo de turbulencia RNG, rugosidad 0.00015 cm y un tiempo de corrida de 30 s.

Tabla 2. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=33$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		M. Físico	M. Numérico	
1	3.68	10.10	10.64	5.38
2	6.05	12.15	12.55	3.32
3	9.36	14.28	14.52	1.68
4	12.71	16.00	16.25	1.58
5	15.78	17.34	17.64	1.77
6	18.66	18.45	18.81	1.92
7	22.05	19.63	20.04	2.09
8	27.74	21.38	21.84	2.18
9	30.00	22.01	22.48	2.13
10	36.58	23.69	24.16	2.00
11	40.18	24.53	25.00	1.92
		Promedio		2.37

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las modelaciones realizadas para los medidores Palmer-Bowlus, con diámetros iguales a: 16 cm, 20 cm, 25 cm y 40 cm, se presentan a continuación:

6.1 Medidor Palmer-Bowlus $D = 16$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=16$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	5.90	6.03	2.19
2	2.00	7.61	7.70	1.05
3	4.00	9.88	10.00	1.19
4	6.00	11.53	11.63	0.92
5	8.00	12.87	12.93	0.50
6	10.00	14.02	14.07	0.34
7	12.00	15.05	15.11	0.43
8	14.00	15.97	16.07	0.60
9	16.00	16.82	17.04	1.31
10	18.00	17.61	17.83	1.28
11	20.00	18.34	18.64	1.60
		Promedio		1.04

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. 2 tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 1.04 %. Para caudales bajos menores a 1.0 l/s, la diferencia se aproxima a 2.5 %.

6.2 Medidor Palmer-Bowlus $D = 20$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus $D=20$ cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	6.04	6.34	4.84
2	2.00	7.75	7.90	1.87
3	4.00	10.01	10.14	1.31
4	6.00	11.66	11.83	1.48
5	8.00	13.00	13.19	1.48
6	10.00	14.15	14.33	1.27
7	12.00	15.17	15.32	0.98
8	14.00	16.10	16.24	0.87
9	16.00	16.95	17.05	0.61
10	18.00	17.73	17.83	0.55
11	20.00	18.47	18.59	0.63
12	22.00	19.16	19.29	0.68
13	24.00	19.82	19.97	0.74
		Promedio		1.33

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 1.33 %. Para caudales bajos menores a 2.0 l/s la diferencia aumenta hasta 2.5 %.

6.3 Medidor Palmer-Bowlus $D = 25$ cm

La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus D=25 cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	1.00	6.22	6.89	10.72
2	2.00	7.92	8.30	4.72
3	4.00	10.18	10.40	2.13
4	6.00	11.82	12.04	1.84
5	8.00	13.16	13.42	1.91
6	10.00	14.32	14.60	2.00
7	12.00	15.34	15.65	2.04
8	14.00	16.26	16.58	1.96
9	16.00	17.11	17.41	1.79
10	18.00	17.89	18.17	1.56
11	20.00	18.63	18.89	1.41
12	24.00	19.98	20.17	0.97
13	28.00	21.20	21.39	0.92
Promedio			2.61	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, la diferencia promedio entre ambos es de 2.61 %. Para caudales bajos menores a 2.0 l/s, la diferencia aumenta superando el valor de 5.0 %.

6.4 Medidor Palmer-Bowlus D = 40 cm

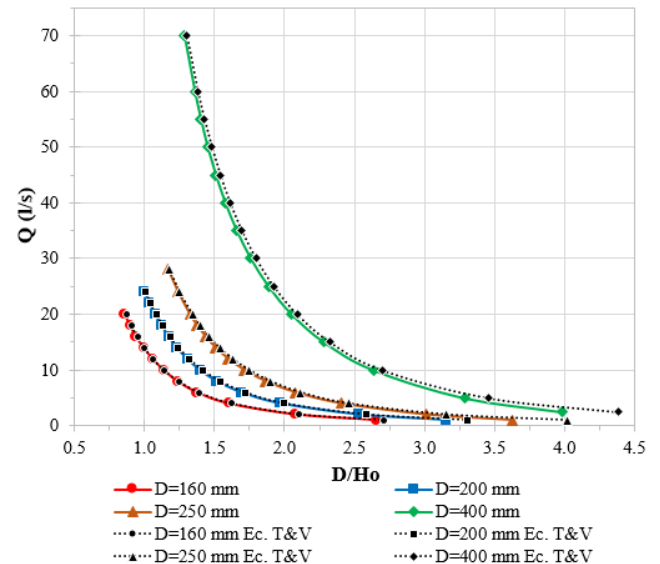
La comparación de los calados obtenidos mediante el análisis dimensional y la modelación numérica, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de calados en el medidor Palmer-Bowlus D=40 cm, para varios caudales

Ensayo	Q (l/s)	Ho (cm)		Error relativo (%)
		Análisis Dimensional	M. Numérico	
1	2.50	9.12	10.05	10.10
2	5.00	11.57	12.18	5.25
3	10.00	14.82	15.17	2.39
4	15.00	17.19	17.53	1.96
5	20.00	19.12	19.50	1.96
6	25.00	20.78	21.21	2.05
7	30.00	22.25	22.75	2.21
8	35.00	23.59	24.11	2.24
9	40.00	24.81	25.37	2.27
10	45.00	25.94	26.52	2.23
11	50.00	27.00	27.59	2.17
12	55.00	28.00	28.54	1.91
13	60.00	28.95	29.45	1.72
14	70.00	30.71	31.17	1.50
Promedio			2.85	

Los resultados obtenidos en el modelo numérico y los resultados de la Ec. (2) tienen excelente aproximación, el error relativo promedio entre ambos es de 2.85 %. Como se puede observar, para caudales mayores a $5 \left(\frac{l}{s}\right)$ es válido utilizar la curva obtenida mediante la modelación numérica.

En la Figura 4, se muestra la comparación de las curvas de descarga obtenidas mediante modelación CFD y análisis dimensional para medidores Palmer-Bowlus de: D=16 cm, D=20 cm, D=25 cm y D=40 cm; que corresponden a los diámetros de tubería más utilizados en los sistemas de alcantarillado de la EPMAPS.

**Figura 4.** Curvas de descarga de los medidores Palmer-Bowlus D=16 cm, D=20 cm, D=25 cm y D=40 cm; obtenidas mediante los análisis numérico y dimensional

7. CONCLUSIONES

En general, los resultados obtenidos por medio del programa FLOW-3D para caudales superiores a $5.0 \left(\frac{l}{s}\right)$, son muy cercanos a los obtenidos con la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010). La mayoría de los resultados de los modelos numéricos presentan una diferencia menor al 2%, con respecto a su contraparte teórica o física; por lo tanto, pueden ser utilizados en la etapa de diseño y operación de un medidor tipo Palmer-Bowlus.

Específicamente, el porcentaje de error relativo entre la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010) y los resultados numéricos, son: para el medidor Palmer-Bowlus de D=16 cm, 1.0 %; para el medidor con D=20 cm, 1.3 %; mientras que para el medidor con de D=16 cm, 2.6%, este incremento es causado por el caudal $1 \left(\frac{l}{s}\right)$, si se excluye los caudales inferiores a $2 \left(\frac{l}{s}\right)$, se aproxima a 1.7 %; finalmente, para el medidor con D=40 cm, 2.9%, con la misma tendencia del caso anterior, para caudales pequeños se tiene mayor diferencia.

La rugosidad del material en este tipo de simulación no tiene mayor influencia; por lo que, es válido utilizar el valor de rugosidad recomendado en la literatura.

Respecto al tamaño de la celda, configurar un tamaño de celda igual a 1 cm, es adecuado para este tipo de modelaciones; ya que, el uso del computador (medido en horas) se septuplica si se disminuye a 0.5 cm y la diferencia entre los resultados es despreciable.

Cada modelación tuvo una duración entre 30 a 120 minutos, siendo la modelación del medidor con D=40 cm la que demandó mayor cantidad de escenarios (14 modelaciones individuales) y una duración individual de 120 minutos; lo que implicó 28 horas de uso computacional para la

obtención de su curva de descarga. En todas las modelaciones se utilizó un computador con las siguientes características: AMD RYZEN 7 1700 (16 núcleos a 3.9 Ghz), 32 Gb de RAM con una velocidad de 3000 Mhz y un disco duro para almacenamiento de 2 TB.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Debido a la cantidad de ensayos experimentales con caudales menores a $5.0\left(\frac{l}{s}\right)$ (un ensayo experimental), no se puede aseverar que la ecuación planteada por Torres & Vásquez (2010), en el rango entre $0\left(\frac{l}{s}\right)$ y $5\left(\frac{l}{s}\right)$, se aproxima a la realidad; por lo que se recomienda realizar más análisis en este intervalo y afinar el coeficiente de descarga.

El programa FLOW-3D es una herramienta muy potente, sin embargo, para optimizar el gasto computacional, y reducir la incertidumbre de los resultados es necesario iniciar con la determinación de: el fenómeno hidráulico a modelar, los escenarios, el grado de exactitud requerido, las condiciones de borde, el tamaño de malla, el tiempo disponible y la capacidad del ordenador; estas son cuestiones fundamentales que pueden demandar horas, días, semanas y hasta meses.

Si bien el FLOW-3D permite realizar la geometría tridimensional en el mismo programa, para geometrías complejas se sugiere el uso del programa CATIA V5, ya que presenta mejores prestaciones en la elaboración de dibujos tridimensionales que el programa AUTOCAD.

Para verificar tanto las curvas de descarga obtenidas en este estudio, como la ecuación teórica - experimental encontrada por Torres & Vásquez (2010), se recomienda modelar físicamente uno de los cuatro medidores Palmer-Bowlus, de preferencia el D = 40 cm, ya que en este se encuentran las mayores diferencias entre la fórmula propuesta por Torres & Vásquez (2010) y el modelo numérico.

A pesar de que, la aproximación entre los análisis físico y numérico es muy buena, en el peor de los casos 2.9 % y en mejor 1.0 %, el planteamiento de ensayos experimentales adicionales permitiría: afinar los coeficientes de descarga de la ecuación teórica - experimental y profundizar en el análisis del medidor con caudales menores a $5\left(\frac{l}{s}\right)$.

REFERENCIAS

- Aulestia, C. (2017). *Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de la captación del Proyecto Toachi - Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD)*. [Tesis Maestría]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD) Programa FLOW-3D*. [Tesis maestría]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos* (Primera ed.). (J. Saldarriaga, Trad.) Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Domínguez, F. (1999). *Hidráulica* (Sexta Edición ed.). Santiago de Chile, Chile: Editorial Universitaria.
- Fernández, J. (2012). *Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Flow Science, Inc. (2016). *Flow-3D v11.2 Documentation*. Flow Science, Inc. Santa Fe: Flow Science.
- Ludwig, J., & Ludwig, R. (1951). Design of Palmer-Bowlus Flumes. *Sewage and Industrial Wastes*, 23(9), 1096-1107. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/25031687>
- Recasens, J. (2014). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero*. Barcelona: UPC BARCELONATECH.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General Vol. 1*. México D.F.: LIMUSA S.A.
- Torres, C., & Vásquez, E. (2010). *Análisis de medidores de caudal para flujo subcrítico en sistemas de alcantarillado*. [Tesis ingeniería]. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method*. New York: John Wiley & Sons.

BIOGRAFÍAS

y Computacional de Fluidos, Modelación Física de Fenómenos Hidráulicos, Diseño de Obras Hidráulicas y Transporte de Sedimentos.



Jorge Augusto Toapaxi Alvarez, Ingeniero Civil. Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Ha trabajado en consultoría, desde el 2010. Profesor e Investigador del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA), desde el 2015. Ha desempeñado los cargos de:

Jefe del Laboratorio Docente de Hidráulica (2016-2019), Coordinador de la Maestría en Hidráulica (2018-2019), Director de Proyectos de Investigación en Mecánica Teórica - Computacional de Fluidos, desde el 2016. Actualmente, es doctorando en Tecnología y Modelización en Ingeniería Civil, Minera y Ambiental en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).



Roberto Carlos Silva Bastidas, Ingeniero Civil experimentado con demostrada trayectoria en el campo de la Ingeniería Civil (hidráulica y construcción). Su trabajo se ha enfocado en los mayores proyectos hidroeléctricos en Ecuador, tales como: el Proyecto Sopladora, Toachi - Pilaton, trasvase Daule - Vinces,

Coca Codo Sinclair, etc. El proyecto previo a la obtención de su Maestría se basa en la modelación CFD del aforador Palmer – Bowlus.



Cristina Alexandra Torres Jacobowitz, Ingeniera Civil, Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional. Experiencia en diseño y evaluación de obras hidráulicas, modelación física y numérica de fenómenos hidráulicos, diseño vial, programación y dirección

de obras civiles. Actualmente trabaja como Profesora Ocasional a tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Sus intereses de investigación se enfocan en: Mecánica Teórica

Análisis de Derrames de Petróleo en el Campo Ancón Mediante Sistemas de Información Geográfica

Mayorga-Mayorga, Henry Santiago^{1,*} ; Reyes-Bueno, Fabián² 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos, Quito, Ecuador

²Universidad Técnica Particular de Loja, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Loja, Ecuador

Resumen: La industria petrolera en el Ecuador inició en 1911 con la perforación del pozo exploratorio ANC001, ubicado en el bloque Gustavo Galindo Velasco (conocido como Campo Ancón); convirtiéndose en el primer campo petrolero con más de 100 años de producción. Esta industria ha traído beneficios económicos para el país, sin embargo, está atada a actividades que impactan sobre el medio ambiente como los derrames de petróleo. En esta investigación se analizan las operaciones que la empresa operadora efectúa, se determinan zonas con mayor probabilidad a la ocurrencia de derrames, se analizan causas y efectos, se identifican zonas vulnerables y se propone una alternativa para reducir los tiempos de respuesta. La herramienta empleada como metodología es Sistemas de Información Geográfica, software que ayuda al gerenciamiento de la prevención y control de los derrames, mediante mapas. Como resultados, se identificaron 297 derrames y 6 áreas con alta probabilidad a estos eventos. La mayoría de ellos se dan por falta de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos e instalaciones y el uso de mecanismos de extracción de crudo operados manualmente. Finalmente, con la alternativa sugerida usando rutas óptimas, se logra mejorar el tiempo de respuesta en un promedio de 20 minutos.

Palabras claves: derrames de hidrocarburos, petróleo, riesgo Ambiental, GIS.

Analysis of Oil Spills in the Ancon Field Using Geographic Information Systems

Abstract: The oil industry in Ecuador started in 1911 with the drilling of an exploratory well ANC001, located in the Gustavo Galindo Velasco block (known as Ancon Field); becoming the first oil field with more than 100 years of production. The development of this industry has brought economic benefits for the development of the country; however, it is tied to activities that have caused serious impacts on the environment such as oil spills. In this investigation, operations carried out by the operating company are analyzed, areas with a higher probability of the occurrence of spills are determined, causes and effects are analyzed, vulnerable areas are identified and alternatives are proposed to reduce response times. The tool used as methodology is Geographic Information Systems, software that helps to manage the prevention and control of spills, through the generation of maps. As results, 297 spills and 6 areas with high probability of these events were identified. Most of them are due to the lack of preventive and effective maintenance of the equipment and facilities and the use of manually operated crude oil extraction mechanisms. Finally, with the suggested alternative using optimal routes, the response time can be improved by an average of 20 minutes.

Keywords: oil spills, environmental risk, oil, SIG.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador posee una gran diversidad biológica, alto grado de endemismo de especies y una variedad de ecosistemas y recursos genéticos que lo definen como un país megadiverso (Revelo, 2002). Debido a la importancia ecológica que representa en el contexto mundial y por la necesidad del aprovechamiento de los recursos naturales en nuestra economía, se requiere la implementación de un marco institucional y jurídico adecuado; así como proyectos que

promuevan la explotación sustentable de los mismos (Cossio et al., 2016).

El desarrollo industrial impulsa mejoras en la calidad de vida de la población y una activación a nivel productivo de la sociedad; sin embargo, trae asociado posibles modificaciones que ocasionan el desequilibrio de los ecosistemas, contaminación y problemas socio-ambientales (Suárez y Molina, 2014). Una industria de gran impacto sobre el medio ambiente es la petrolera. A lo largo de la historia del país, se

*mayorgamhs@hotmail.com

Recibido: 26/04/2021

Aceptado: 04/01/2022

Publicado: 01/02/2022

10.33333/rp.vol49n1.05

CC 4.0

han suscitado varios casos de desastres ambientales relacionados con la industria petrolera, especialmente derrames de hidrocarburos (Bravo, 2007).

Los derrames de petróleo provocan una seria afectación en el suelo, poniendo en riesgo la flora, fauna y microorganismos presentes; reduce su fertilidad y crecimiento de plantas para la sobrevivencia de animales. Además, representa un peligro latente para las personas que se radican dentro de su área de influencia ya que impacta sobre su salud, sistemas de producción y estilo de vida (Cavazos et al., 2014).

La explotación petrolera en el Ecuador inició en el Bloque Gustavo Galindo Velasco conocido como Campo Ancón en 1911. Desde allí, esta industria se ha ido expandiendo y se ha convertido en la principal fuente de ingresos económicos para el país. En la actualidad, la falta de liquidez generada por los bajos precios de los hidrocarburos a nivel internacional, evidencia la dependencia de nuestra economía al aprovechamiento de este recurso (Guillaume, 2002).

La empresa operadora actual Pacifpetrol S.A. inició su operación en el año 2002 en el Bloque Gustavo Galindo Velasco, dedicada a la exploración y explotación de crudo, tiene como prioridad la protección de la integridad de la vida humana y del ecosistema en toda su zona de influencia (Velastegui y Veloz, 2007).

Luego de cien años de producción petrolera en este bloque, las condiciones mecánicas de los pozos e infraestructura petrolera (como líneas de flujo y oleoductos); así como los procedimientos manuales empleados resultan obsoletos por la falta de mantenimiento y la falta de instalación de nuevas tecnologías, lo que ha ocasionado la generación de varios casos de desastres ambientales relacionados con sus actividades, en especial la ocurrencia de derrames de hidrocarburos (Espinel, 2017).

El Campo Ancón se encuentra rodeado de población urbana, misma que resulta vulnerable a impactos generados por derrames de petróleo. Además, se debe considerar el gran impacto ambiental al que se encuentra expuesto el ecosistema de la zona de análisis en caso de suscitar estos eventos (Velastegui y Veloz, 2007).

Por ello, la empresa operadora ha invertido muchos recursos humanos, técnicos y financieros para tratar de solventar la problemática de los derrames, sin encontrar una salida clara (Espinel, 2017). Ante esta situación, se ha planteado la presente investigación como tema de estudio que se convertirá en una herramienta clave para afrontarlos de una forma inmediata, organizada y efectiva frente a estas emergencias.

Este trabajo de investigación pretende caracterizar las causas y efectos de los derrames de hidrocarburos ocurridos en el Bloque Gustavo Galindo Velasco e identificar las operaciones de exploración, producción y transporte de hidrocarburos que contribuyen a la generación de derrames. Además, se pretende identificar zonas más propensas y áreas vulnerables frente a nuevos siniestros. Finalmente, se presenta una alternativa para reducir los tiempos de respuesta ante derrames de petróleo en este campo.

Los resultados logrados en el presente proyecto serán de gran importancia para la operadora como para las empresas (estatales y privadas) involucradas en la industria petrolera debido a la falta de estudios similares en la zona de análisis. Además, esta investigación promoverá la conservación biológica y la prevención de la contaminación del suelo y agua, aspectos relevantes que se deben garantizar dentro de la legislación ambiental ecuatoriana.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio

El bloque Gustavo Galindo Velasco (Bloque 2) se encuentra ubicado en la península de Santa Elena, aproximadamente a 130 km. al oeste de la ciudad de Guayaquil (Figura 1). En él se han perforado, desde principios del siglo pasado, aproximadamente 2882 pozos, incluyendo los primeros pozos productores del Ecuador. El bloque comprende 1200 km² de los cuales 480 km² corresponde a la extensión costa afuera (40%).

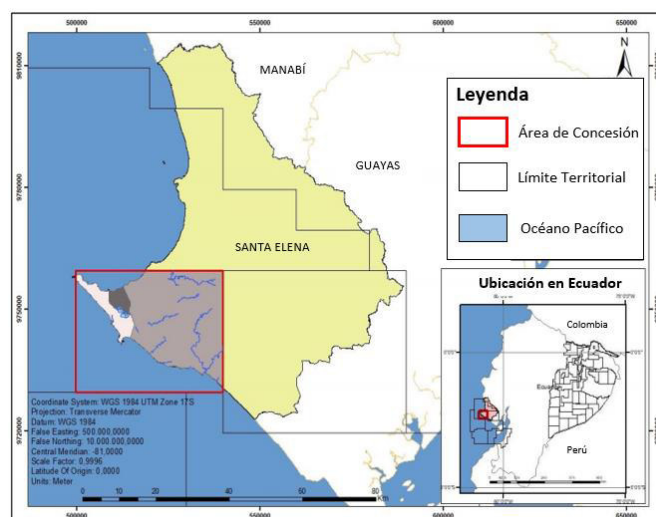


Figura 1. Mapa de ubicación del Campo Ancón

2.2 Adquisición de Datos

Para la identificación y registro de los derrames de hidrocarburos suscitados, se solicitó la base de datos histórica de los derrames de hidrocarburos ocurridos en el Bloque Gustavo Galindo Velasco a la empresa operadora. La información contenida dentro de la matriz de derrames fue número de evento, fecha de ocurrencia, ubicación geográfica, causa, consecuencias, área y tipo de vegetación afectada, infraestructura petrolera asociada, volumen de hidrocarburo derramado, volumen de suelo afectado, descripción detallada del suceso, medidas de remediación y acciones correctivas para evitar futuros eventos.

Los datos geográficos de los pozos e instalaciones petroleras (plataformas, tanques de recolección de crudo, tanques de almacenamiento, base de operaciones, centro de procesamiento de producción, centro de transferencia de crudo, oleoductos y piscinas de tratamiento de residuos sólidos) ubicados en el Bloque 2 se obtuvo de los departamentos de Geología y Medio Ambiente de la compañía

operadora. Igualmente, se nos facilitó los *shapefiles* de los límites del campo, áreas de división del bloque y rutas principales de las unidades de extracción y recolección de petróleo.

La información socio-económica de casas, escuelas, hospitales y población se descargó del portal web del Instituto Geográfico Militar (IGM). Mientras que las variables ambientales de áreas protegidas, ríos, lagos y océanos cercanos a la zona de estudio se obtuvo del Sistema Nacional de Información (SNI).

2.3 Procesamiento de Información

Con respecto a los derrames ocurridos, se tabularon todos los datos en Excel en una matriz de los incidentes ocurridos conforme lo establece la legislación ambiental ecuatoriana. A continuación, se realizaron tablas dinámicas y gráficos (pastel y en barras) para determinar las principales causas y efectos ocasionados por los derrames en el periodo de tiempo analizado.

Completada la fase de recopilación de datos geográficos, se realizó el procesamiento de los mismos y la carga de información en el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS versión 10.3.

Para la determinación de las áreas propensas a nuevos derrames de petróleo, se realizaron *buffers* de impacto a cada derrame, considerando un radio de afectación de 100 metros. Esto se realizó con el objetivo de identificar zonas con patrones de ocurrencia en las cuales han ocurrido varios derrames y así poder delimitar estas zonas. Se delimitaron las áreas proclives a la ocurrencia de derrames, mediante la herramienta de trazado y dibujo de un nuevo *shapefile* de tipo polígono.

Para la determinación de las zonas más vulnerables a los derrames de petróleo y cuya conservación es prioritario, se sobrepusieron las capas variables socio-económicas (casas, escuelas, hospitales y población) y *shapefiles* de parámetros ambientales (áreas protegidas, ríos, lagos y océanos) con los *shapefiles* de derrames e instalaciones petroleras.

Se solicitó a la empresa operadora y al Ministerio de Ambiente del Ecuador, el plan de contingencias ante derrames de petróleo del bloque Gustavo Galindo Velasco. En este documento, se analizaron los equipos, procedimientos, personal y recursos de contingencia para optimizar los tiempos de respuesta. Se revisaron los tiempos de respuesta que se establecen en el plan de contingencias de derrames del bloque considerando la ubicación de los equipos de contención de derrames y el tiempo de actuación del personal. Se analizaron las rutas óptimas en ArcGIS ubicando puntos estratégicos para la colocación de los equipos de contención de derrames en los cuales se pueden llegar a las zonas proclives a la ocurrencia de derrames en menores tiempos. Se lo presentó en un mapa. Finalmente, se emitieron las recomendaciones al plan para reducir los tiempos de respuesta con el fin de minimizar el impacto ambiental que futuros derrames puedan ocasionar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Operaciones e infraestructura petrolera en el Bloque Gustavo Galindo Velasco

El ciclo de producción petrolera en el Bloque Gustavo Galindo Velasco comienza con la planificación del departamento de Ingeniería, ahí se establece la lista de los pozos a intervenir diariamente y la producción de crudo a recolectar de los tanques. Esta plantilla diaria se envía a los operadores de Producción, quienes distribuyen geográficamente sus visitas en las unidades de extracción y recolección para cumplir con la meta de producción de ese día.

La producción de petróleo es extraída por dos métodos: sistemas de levantamiento móviles y fijos. El sistema fijo es el mecanismo de producción por Bombeo Mecánico, cuya unidad está interconectada desde el pozo, llevando la producción del subsuelo hacia superficie por medio de tuberías y bomba. Esta producción se transporta hacia los tanques de almacenamiento ubicados a unos 300 metros en un arreglo de un conjunto de pozos, esto sin intervención humana. El 55% de la producción diaria del bloque se extrae por medio de balancines (Bombeo Mecánico). Otros sistemas de levantamiento fijos usados en el Bloque Gustavo Galindo Velasco son *Gas Lift*, *Plunger Lift* y Flujo Natural, cuya producción está igualmente interconectada. Sin embargo, el porcentaje de producción que se extraen por estos métodos es relativamente pequeña con apenas el 2% del total.

Cuando se llena la capacidad de los tanques de almacenamiento, unidades de recolección de crudo llevan la producción contenida hacia la Casa Bomba; que es el centro de procesamiento de producción del Bloque. En este lugar, se realiza una separación simple de los hidrocarburos ya que debido al alto grado API (crudo liviano), la separación del agua y crudo solamente se realiza por decantación física.

Mientras que el 40% de producción de crudo restante es extraída mediante sistemas de levantamiento de crudo móviles, es decir por *Swab* (SW) y Herramienta Local (HL). Ambos son métodos manuales que consisten en camiones pequeños adaptados para recuperar el petróleo por medio del pistoneo de los operadores en superficie; es decir son operados con intervención humana. Estas unidades de extracción de petróleo recorren el campo y visitan los pozos, recuperando el potencial de cada uno. Las visitas a cada pozo, tanto de sistemas móviles como fijos, no son diarias, sino que depende del potencial y ciclo de cada uno. Existen pozos visitados con frecuencia mensual, semanal y diaria.

Una vez cubierta la capacidad de recolección de cada unidad de extracción, estos mismos camiones transportan la producción hacia Casa Bomba. La fiscalización del volumen de producción por parte de los entes gubernamentales se realiza en los tanques de almacenamiento de 20.000 barriles. Un diagrama esquemático del proceso de producción y recolección de crudo en el Bloque Gustavo Galindo Velasco se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Diagrama de Procesos manejados por la empresa operadora

En la Figura 3, se puede observar la ubicación geográfica de las instalaciones petroleras existentes en el Bloque 2. En total existen: 2879 pozos perforados (activos en 2018 fueron 1338 pozos), 133 tanques de almacenamiento, aproximadamente 85 km de oleoductos y líneas de flujo, Casa Bomba y la Base de Operaciones.

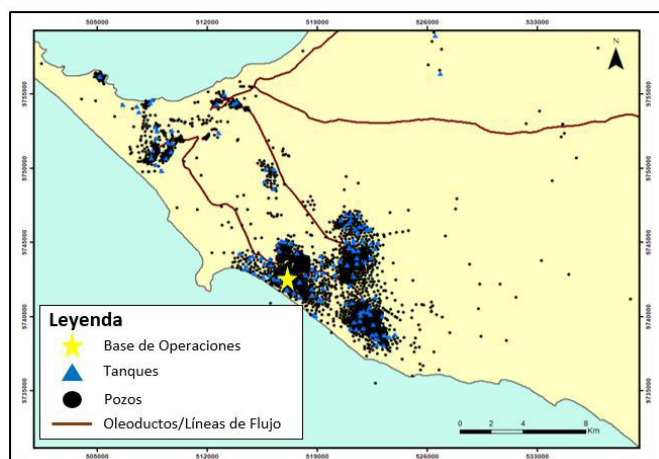


Figura 3. Instalaciones petroleras en la zona de estudio

3.2 Derrames de petróleo ocurridos en el Campo Ancón

Durante el período 2014 – 2018, en el Bloque Gustavo Galindo Velasco sucedieron un total de 297 derrames de hidrocarburos. La distribución del número de derrames por año se la presenta en la Figura 4. Los meses en los que suceden el mayor número de derrames corresponde a marzo, abril (temporada de lluvias) y en julio. Hay una tendencia a que los últimos meses del año hay un incremento significativo de incidentes, especialmente en diciembre que es una época festiva.

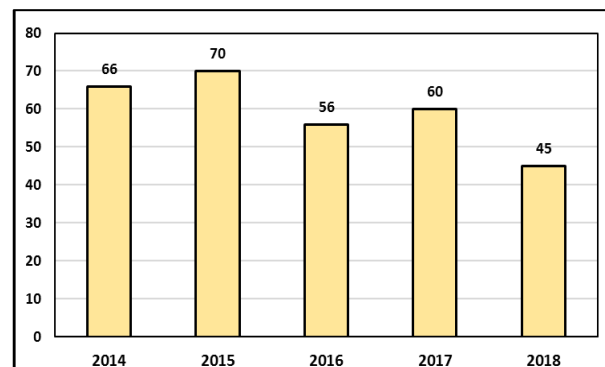


Figura 4. Número de derrames de petróleo ocurridos durante el período 2014-2018 por año

Con respecto al volumen derramado, la empresa operadora hace una distinción entre un incidente grave cuando el derrame supera los 5 barriles, mientras que un incidente es catalogado como moderado cuando el derrame es menor que 5 barriles. Del total de derrames ocurridos en la zona de estudio, el 98% corresponde a derrames menor a 5 barriles y un 2% son considerados incidentes graves.

En la Figura 5 se presenta la ubicación geográfica de los 297 derrames de hidrocarburos ocurridos. De ellos, la mayor parte ocurrieron en el cantón Santa Elena (73%), un 20% en Salinas y el 7% del total ocurrieron en La Libertad.

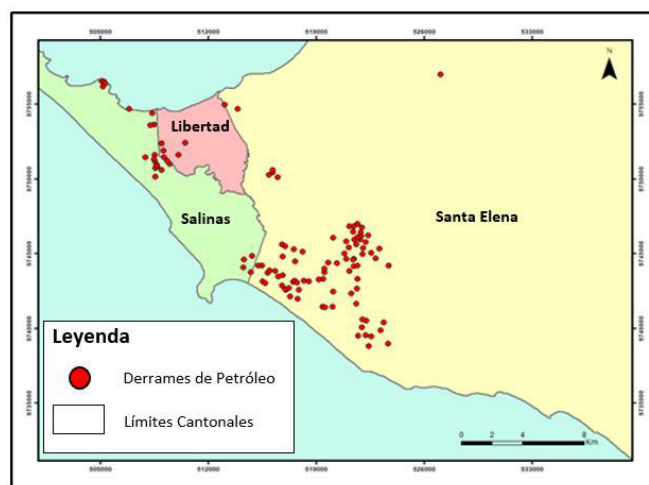


Figura 5. Ubicación geográfica de los derrames ocurridos

3.3 Causas de los derrames de petróleo ocurridos en el Bloque 2

Las principales causas de los derrames de hidrocarburos en el Bloque Gustavo Galindo Velasco son falla humana (47%), falla mecánica (34%), eventos cuya causa no ha sido establecida (14%) y otros (5%) que se asocian a condiciones climáticas y problemas de corrosión en los equipos, como se presenta en la Figura 6.

Con respecto a fallas humanas, un hecho importante es la profundidad del pozo. Se verificó que la mayor cantidad de derrames suceden en pozos profundos y medios (92%); cuya profundidad es mayor a 1000 pies. Esto se debe a que a mayor profundidad del pozo es más complicada su intervención y por ende mayor probabilidad a una mala práctica operativa.

Un aspecto importante asociado a fallas mecánicas para la ocurrencia de derrames en la zona de estudio, es la antigüedad de los pozos petroleros (condiciones mecánicas de tuberías, cabezales, herramientas, etc). La mayor cantidad de pozos en los que ocurrieron los derrames, fueron perforados entre 1920-1960 (82%). Muchos de ellos tienen casi 100 años de vida operativa y de producción.

La mayor cantidad de derrames de hidrocarburos suceden en los pozos petroleros con un 68%. El 14% del total de derrames suceden en oleoductos y líneas de flujo. En estaciones de producción y tanques de almacenamiento, suceden un 7% de derrames. Finalmente, el 4% del total se producen durante el transporte de fluidos de producción en tanqueros; como se visualiza en la Figura 6.

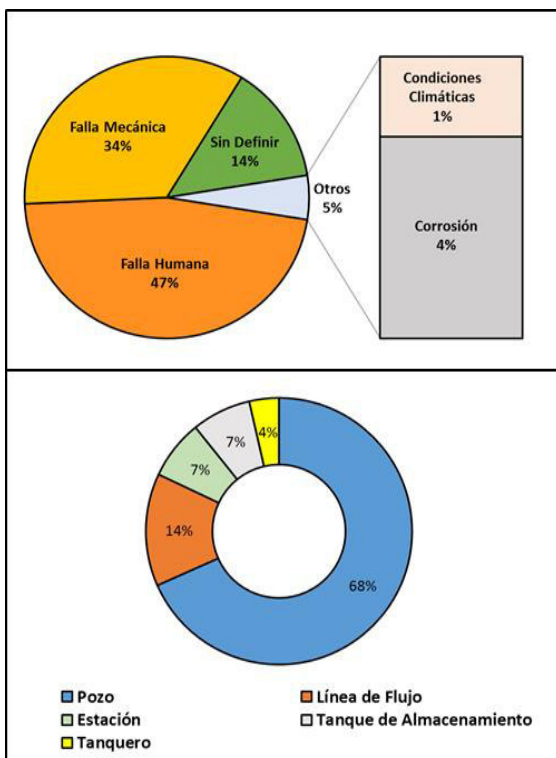


Figura 6. Causas de los derrames de hidrocarburos (superior) e instalaciones petroleras en las que se originaron (inferior)

3.4 Efectos generados por los derrames de petróleo

El efecto generado por los 297 derrames de hidrocarburos suscitados en el Bloque Gustavo Galindo Velasco en el periodo 2014 – 2018, dan como resultado un total de 1514 m³ de suelo contaminado. En la Figura 7, se realiza una comparación entre el número de derrames con respecto al volumen de suelo contaminado. En el 2018, a pesar que el número de derrames totales es menor, existen 384 m³ de suelo afectado. Esto se debe a que en este año ocurrió la mayor cantidad de incidentes ambientales de categoría grave.

Con el objetivo de remediar el suelo afectado por los derrames de hidrocarburos, la empresa operadora implementa planes de acción para intervenir de manera oportuna ante estas emergencias. Sin embargo, este tipo de sucesos traen consigo afectaciones al medio ambiente y su remediación incrementa los costos de operación de la empresa.

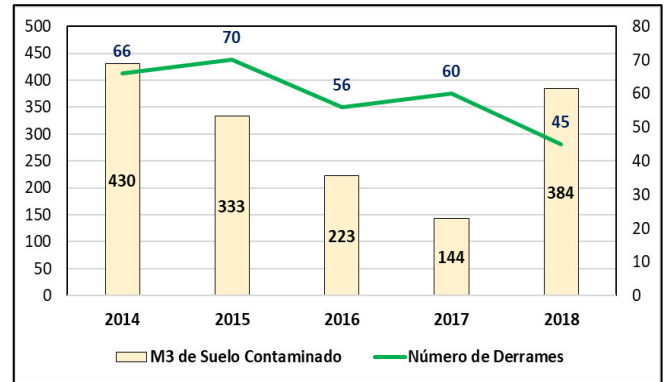


Figura 7. Volumen de suelo contaminado por los derrames

3.5 Zonas de alta probabilidad de ocurrencia de futuros derrames

Se realizaron *buffers* alrededor de cada derrame con un radio de impacto de 100 metros, simulando un área de afectación circular promedio de los derrames históricos. Como resultado se identificaron 6 áreas con alta probabilidad a la ocurrencia de derrames, representadas en la Figura 8. Estas 6 zonas proclives a derrames ocupan un área total de 109 km², es decir representan el 16% del territorio continental del Bloque Gustavo Galindo Velasco. Además, al estar cerca del Océano Pacífico, representan un peligro muy alto.

Se determinó que cerca del 70% del total de derrames de hidrocarburos, sucedieron en los pozos y que existe un patrón de ocurrencia de derrames en zonas de mayor acumulación de pozos. Esto responde a que los pozos son las principales instalaciones petroleras que son intervenidas diariamente con métodos manuales operados por el ser humano y que se asocian a la generación de vertidos de hidrocarburos por su intervención misma y por la falta de un mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos e infraestructura. Sumados al hecho de que, al ser el primer campo petrolero del país con más de 100 años de producción, muchos de los componentes han sobrepasado su vida útil.

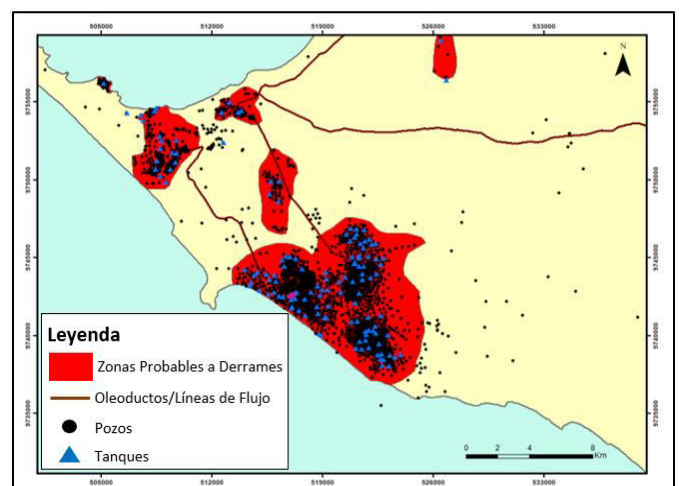


Figura 8. Zonas proclives a la ocurrencia de derrames

3.6 Áreas de conservación prioritaria ante los derrames

En la zona de estudio se identificó la presencia de variables ambientales y sociales, cuya conservación es prioritaria en el caso de la ocurrencia de un derrame (Figura 9); mismos que se detallan a continuación.

Dentro del territorio adjudicado para la operación petrolera del Bloque Gustavo Galindo Velasco, se encuentra una Reserva que pertenece al Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador (SNAP). Corresponde a la Reserva de Producción de Fauna Puntilla de Santa Elena, cuya área ofrece hábitats y condiciones óptimas, tales como refugio, alimento, y buenas condiciones ambientales para una gran riqueza de especies de flora y fauna. Comprende 52.231 hectáreas de área marina y 203 hectáreas en tierra. Este ambiente encierra diversos ecosistemas como: arrecifes rocosos, playas de arena, playas mixtas (arena y roca), acantilados, matorral seco y matorral seco espinoso (Moscoco, 2015).

La fauna es rica y variada, con presencia de animales endémicos de la zona. Sobresalen la variedad de ecosistemas que propician la presencia de una abundante diversidad de animales. La vegetación se caracteriza por su enorme heterogeneidad que sirve de alimento y otras fuentes de uso para la población.

La provincia de Santa Elena alberga una población estimada de 308.000 habitantes fijos y unas 200.000 personas en épocas de alto turismo; según datos oficiales del último censo realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). Igualmente, se identificó la presencia de 20 poblados a lo largo de la provincia con alta densidad de gente, cuya supervivencia podría ser afectada ante la ocurrencia de derrames.

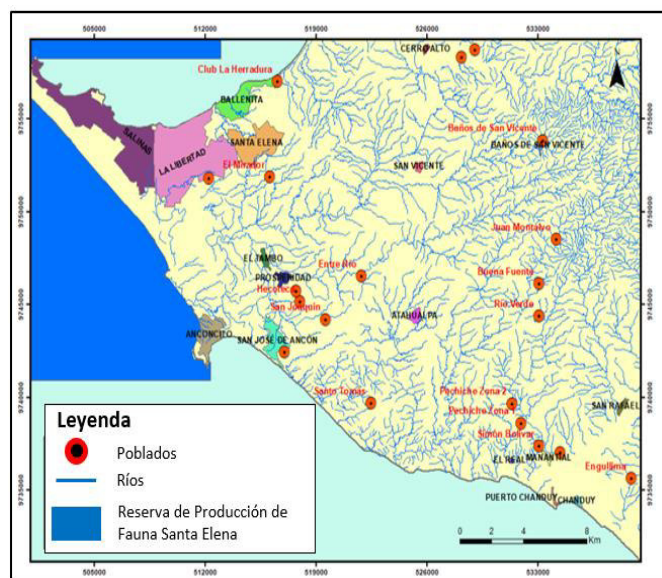


Figura 9. Zonas vulnerables a la ocurrencia de derrames

Se determinó la ubicación de varios ríos en los cantones de La Libertad, Santa Elena y Salinas, muchos de los cuales desembocan en el Océano Pacífico. Esta provincia está conformada por 44 unidades hidrográficas, siendo las cuencas de los ríos Javita y Zapotal las más grandes e importantes. En

ellas se provee agua de consumo humano para la población rural y urbana, así como agua destinada para riego en actividades agrícolas y ganaderas (Koupermann, 2014).

Se verificó que todos estos aspectos socio-ambientales previamente mencionados, podrían tener serias afectaciones en el caso de ocurrir derrames de hidrocarburos ya que las condiciones ambientales y climáticas favorecerían a un rápido esparcimiento de los compuestos químicos vertidos.

En consecuencia, el nivel de riesgo ante la ocurrencia de un derrame de hidrocarburos en el Bloque Gustavo Galindo Velasco es muy alto por las nefastas consecuencias que puede provocar sobre el medio ambiente y la población cercana, si no se toman las medidas para minimizar su impacto.

3.7 Mapa de rutas óptimas y tiempos de respuesta ante la ocurrencia de un derrame

En el Campo Ancón existen vías de tipo primaria, secundaria, caminos vecinales y rutas locales. Se observó que, para llegar a las zonas proclives a derrames (zonas en las que existen la mayor probabilidad de que se generen derrames), se podría viajar a través de las vías primarias y secundarias; esto para reducir el tiempo de respuesta en estas zonas.

Considerando que los equipos para la contención de derrames son vehículos pesados de carga cuyos límites de velocidad según la Agencia Nacional de Tránsito del Ecuador en carreteras es 70 km/h y en zonas urbanas 50 km/h; se usó una velocidad promedio de 60 km/h para objeto de este análisis.

Para la determinación de las rutas óptimas se usó la herramienta Rutas de ArcGIS considerando las rutas de menor longitud y que se puedan alcanzar los puntos más lejanos en las zonas proclives a derrames. Además, se propuso que dentro de este análisis espacial se tenga como prioridad a las vías de primer y segundo orden para el transporte de los vehículos de contención de derrames.

La empresa operadora posee los equipos de contención de derrames y los vehículos pesados para atender estas emergencias se encuentran ubicados en la Base de Operaciones. A partir de este punto, se presenta en la Figura 10 las rutas óptimas para llegar a un determinado derrame de hidrocarburos en las zonas con alta probabilidad de ocurrencia.

Considerando una velocidad promedio de 60 km/h y la distancia de las rutas óptimas por las cuatro alternativas de rutas presentadas en la Figura 10, el tiempo de respuesta promedio calculado con esta propuesta es 20 minutos.

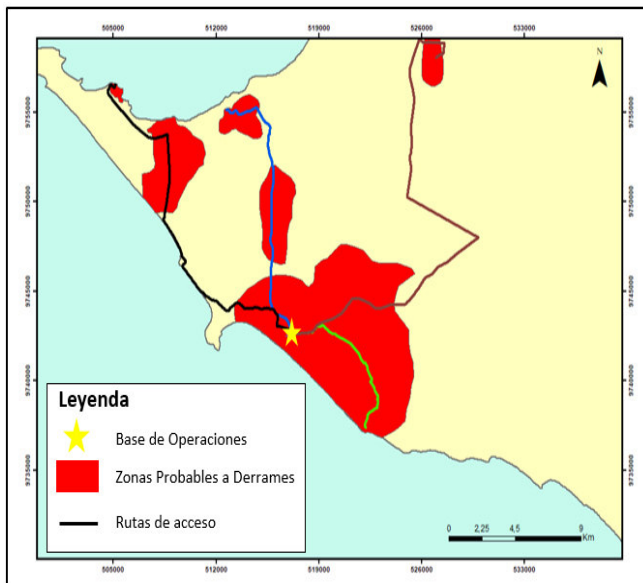


Figura 10. Rutas óptimas para alcanzar los derrames de zonas proclives

4. CONCLUSIONES

El Campo Ancón es el primer bloque petrolero del Ecuador con más de 100 años de producción. La antigüedad de sus instalaciones petroleras combinado con la operación manual de la mayor parte de sus procesos diarios, lo convierten en una zona con alta probabilidad a la ocurrencia de derrames de hidrocarburos.

La zona de estudio presenta variables socio-ambientales altamente vulnerables a la ocurrencia de derrames de petróleo, que sumado a condiciones ambientales y climáticas favorecerían un rápido esparcimiento de los compuestos químicos vertidos. Por ello, se debería analizar la propuesta de rutas óptimas propuestas en esta investigación para reducir los tiempos de respuesta del plan de contingencias ante derrames.

Se recomienda realizar un estudio de pre-factibilidad técnica y económica para el cambio del equipamiento y componentes que han sobrepasado su vida útil y realizar un mantenimiento preventivo y correctivo a los equipos de forma constante y más recurrente.

REFERENCIAS

- Bravo, E. (2007). Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad. *Acción ecológica*. 24(1). 35-42. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Cavazos, J., Pérez, B., & Gutiérrez, A. (2014). *Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelo agrícolas de Acatzingo* (Tesis de Pregrado). Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Puebla, México.
- Cossio, N., Radice, M., Murillo, M., & Manjarrez, N. (2016). Biocomercio y biodiversidad en el Ecuador. *Revista Científica Ecociencia*, 3(6), 1–27. Quito: Universidad Estatal Amazónica. <https://doi.org/10.21855/ecociencia.36.15>
- Espinell, C. (2017). *Plan de Contingencia para derrames de hidrocarburos transportados por líneas de flujo en el Campo Gustavo Galindo* (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- Guillaume, F. (2002). Sobre Bonanzas y Dependencia: Petróleo y Enfermedad Holandesa en el Ecuador. *Íconos. Revista de FLACSO-Ecuador*. 13, 102-110. Quito: Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. <https://doi.org/10.17141/iconos.13.2002.628>
- Koupermann, J. (2014). *Determinación y mapeo de las áreas potencialmente incorporables al desarrollo sustentable, a partir de la implementación del Plan Hidráulico en la provincia de Santa Elena* (Tesis de Pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador.
- Moscoso, M. (2015). *Diversidad y abundancia de peces arrecifales en Bajos 43 y 48 de la Reserva de Producción Faunística Marino Costera Puntilla de Santa Elena* (Tesis de Pregrado). Universidad Estatal Península de Santa Elena. La Libertad.
- Revelo, L. (2002). *La conservación y uso sustentable de la biodiversidad en el Ecuador*. Quito: Instituto de Altos Estudios Nacionales.
- Suárez, S., & Molina, E. (2014). El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. vol.52, n.3, pp.357-363. La Habana.
- Velastegui, L., & Veloz, C. (2007). *Elaboración del plan de contingencias para las operaciones hidrocarburíferas desarrolladas en el Campo Gustavo Galindo Velasco* (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

BIOGRAFÍAS



Henry Santiago Mayorga Mayorga, nació en Quero-Ecuador el 5 de septiembre de 1993. Culminó sus estudios secundarios en el Colegio Bolívar de Ambato. Se graduó de Ingeniero en Petróleos en la Escuela Politécnica Nacional a inicios del 2017. Culminó también una segunda carrera de pregrado en la Universidad Técnica Particular de Loja como

Ingeniero en Gestión Ambiental. Actualmente labora como Ingeniero de Reservorios en Grupo Petrogas y está estudiando un MBA en el Tecnológico de Monterrey.



Fabián Reyes Bueno, PhD en Ingeniería para el desarrollo rural por la Universidad de Santiago de Compostela-España. Ingeniero Forestal por la Universidad Nacional de Loja. Docente universitario en la UTPL de la materia de Cartografía, Sistemas de Información Geográfica, y, Ordenación Territorial. Experiencia de 19 años en Sistemas de

Información Geográfica, Temas de interés: SIG, Planificación y ordenación territorial, administración de tierras, catastro y valoración de tierras.

Migración de Finos en el Reservorio Hollín: Diagnóstico, Evaluación y Prácticas de Estimulación desde el Laboratorio hasta la Implementación en Campo

Ruilova, Mayra^{1,*} ; Izurieta, Álvaro² 

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Quito, Ecuador.

²Halliburton, Quito, Ecuador

Resumen: El presente estudio muestra las diferentes pruebas de laboratorio utilizadas para reconocer los mecanismos de daño de formación y enlazar el comportamiento de producción asociado con la arenisca Hollín de la Cuenca Oriente. Se sugieren distintos tratamientos para mejorar la productividad y expandir la vida productiva del pozo. El análisis comienza con un diagnóstico con base en los históricos de producción del campo de estudio, definiendo la migración de finos como mecanismo de daño principal, esta hipótesis es luego verificada mediante Difracción de rayos X que nos mostraron la presencia de caolinita e illita en los núcleos estudiados. Una vez identificado el mecanismo de daño del reservorio Hollín, se procedió a recomendar fluidos amigables con la formación, así como tratamientos de estimulación matricial con base en las pruebas de retorno de permeabilidad para fluidos de control, sistemas ácidos, estabilización de finos, y modificadores de permeabilidad relativa. Además, se propone fractura hidráulica en combinación con los tratamientos antes descritos como alternativa para mejorar y extender la vida productiva de los pozos.

Palabras clave: Retorno de permeabilidad, XRD, Estimulación Ácida, Mecanismo de Daño, RPM, Fractura.

Fines Migration in the Hollín Sandstone: Diagnosis, Evaluation and Stimulation Practices from the Laboratory to Field Implementation

Abstract: This study shows laboratory tests used to recognize formation damage mechanisms and corresponding production behavior for the Hollin sandstone located in the Oriente Basin. Different stimulation treatments are suggested to improve productivity and expand the productive life of the well. The analysis begins with diagnosis based on historical production data where fines migration is hypnotized as a main formation damage mechanism, which is verified by the presence of kaolinite and illite in core data obtained from X-ray Diffraction tests. Once the main damage mechanism is identified, different treatments are recommended on regained permeability tests for completion brines, acid blends, fines stabilization, and relative permeability modifiers. Furthermore, hydraulic fracturing in combination with treatments described previously is proposed as an alternative to improve and extend the productive life of the well.

Keywords: Regained Permeability, XRD, Acid Stimulation, Damage Mechanism, RPM, Fracture.

1. INTRODUCCIÓN

Las operaciones de producción implican la interacción de diferentes tipos de fluidos con la roca reservorio. Al ingresar un fluido a la formación, este interactúa con el fluido original del yacimiento y la formación, ocasionando el desprendimiento de arcillas de migración como caolinita que taponan las gargantas porales. Este fenómeno se manifiesta como daño formación resultado en declinación de la producción esperada del pozo.

En los últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías que han ayudado a una mejor selección de fluidos orientados

a mejorar y extender la vida productiva de los pozos como: fluidos de control, sistemas ácidos, fluidos de fractura y control de agua, sin embargo, estos fluidos pueden reaccionar de una manera diferente dependiendo las características petrofísicas y mineralógicas de la roca, presiones y características del crudo y agua producidos.

Uno de los principales mecanismos de daño de formación en los reservorios de la cuenca Oriente es la migración de finos, el cual se visualiza a lo largo de la producción, ya que existe una disminución de producción significativa al incrementar el corte de agua. La selección de fluidos adecuados a ser usados en el reservorio Hollín permitirá recuperar la productividad de

*jizbellru@hotmail.com
Recibido: 30/06/2020
Aceptado: 04/02/2022
Publicado: 01/02/2022
10.33333/rp.vol49n1.06
CC 4.0

la arena y disminuir el costo de producción por barril de la empresa operadora, y de esta manera incrementar los ingresos y rentabilidad de los proyectos petroleros.

2. OBJETIVOS

- Analizar los mecanismos de daño más frecuentes a través de pruebas de retorno de permeabilidad para la Arena Hollín en un campo petrolero del Oriente Ecuatoriano.
- Identificar las diferencias mineralógicas de los distintos núcleos para el reservorio Hollín.
- Determinar el mecanismo de daño que afecta a la Arena Hollín.
- Evaluar el retorno de permeabilidad en fluidos de control, sistemas ácidos, y control de agua específicos.
- Identificar estrategias para la prevención y / o reducción del daño potencial de la formación de pozos productores del reservorio Hollín.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diagnóstico

Se realizó un diagnóstico con base en los diferentes casos históricos de producción del campo de estudio, observando el comportamiento de la producción de fluido en el tiempo. Además, se estudió los registros litológicos de los pozos que permitieron conocer mineralogía del reservorio, a través de estos primeros datos se observó un posible problema en la producción del reservorio Hollín.

Es importante destacar que el tipo de fluido de estimulación utilizado es un fluido ácido, el cual consta de 3 componentes importantes: fluido de control o prelavado, fluido de estimulación y un fluido de desplazamiento.

Cloruro de Amonio: Proporciona suficiente intercambio iónico y mantiene la concentración de sal para evitar que la arcilla se hinche antes y después del tratamiento ácido evitando el intercambio iónico.

Ácido Clorhídrico: Reacciona con las formaciones de carbonato y se utiliza como pre-flujo ácido en el tratamiento de formaciones de arenisca. El HCL puede servir como ácido básico para la eliminación de escala

Ácido Acético: este ácido es más débil que el ácido clorhídrico y presenta menos problemas de corrosión que el HCL; lo que significa que sus iones de hidrógeno se liberan más lentamente que el HCL con la mayoría de los materiales que se encuentran en los pozos. Debido a su bajo grado de corrosividad, los ácidos orgánicos pueden usarse a temperaturas más altas para tratamientos de acidificación. El ácido acético es el único ácido que no daña la tubería cromada usada en campos con alto contenido de CO₂.

Bifluoruro de Amonio: Reacciona con el HCL para formar ácido fluorhídrico, HF. El HF disuelve las arcillas de migración como la caolinita.

Aditivo de control de arcillas: Controla la migración e hinchamiento de arcillas. Este se adsorbe en las gargantas porales evitando el contacto de las arcillas (finos de migración) con fluidos que provoquen intercambio iónico y posterior migración de finos.

Inhibidor de Corrosión: Limita la corrosión que pueda generar el tratamiento ácido a los tubulares y equipos instalados.

Surfactante: Tiene la función de ayudar a la prevención de emulsiones y retorno de los fluidos inyectados una vez que el pozo entra en producción.

Caso 1

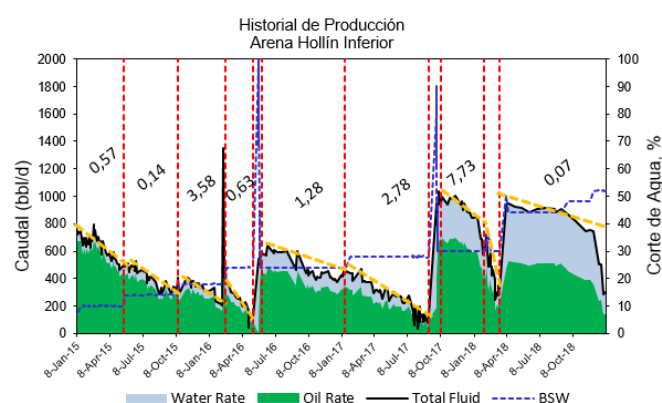


Figura 1. Caso 1 de Producción Campo de estudio

En este caso, se observa que conforme la producción de agua va incrementando, la producción de petróleo disminuye $m=1.76$, 0.57 y 0.14 (donde m = pendiente). La disminución de la producción inicial puede deberse a dos fenómenos: el primero debido al cambio en la permeabilidad relativa por el incremento de la saturación de agua, por presencia del acuífero constante en el reservorio Hollín (Baby et al, 2014) , y el segundo debido a que existe una interacción entre el reservorio y el agua, lo cual provoca el comienzo de la migración de finos debido al intercambio iónico de presente en el reservorio y el agua que intruye como parte del mecanismo de producción natural del reservorio. (Civan, 2000), Figura 1.

En este caso de estudio, se considera al segundo escenario como válido debido a la respuesta de producción incremental posterior a la estimulación ácida, y dado que se realizan varias estimulaciones en la vida del pozo con respuesta positiva, es por eso por lo que se considera este efecto como el de mayor relevancia, sin que el primero sea descartado completamente.

El 8 de mayo del 2016, se realiza una primera rehabilitación de pozo en el cual se utilizó el diseño de fluido I.

Tabla 1. Composición del fluido I

Químico	% Volumen
Bifluoruro de Amonio	20 %
HCl	43,8 %
Cloruro de Amonio	43,8 %
Inhibidor de corrosión	0.4 %
Surfactante	0.2 %

Composición del fluido II y III	
Químico	% Volumen
Bifluoruro de Amonio	20 %
HCl	43,8 %
Cloruro de Amonio	7,7 %
Ácido Acético	3 %
Aditivo Control de Arcillas	0,2 %
Inhibidor de corrosión	0,4 %
Surfactante	0.2 %

La reacción del reservorio con el fluido diseñado muestra un incremento en la producción de agua y de petróleo, sin embargo, los resultados no son tan favorables, ya que existe un aumento de la producción de agua de aproximadamente del 24 %, pero la producción de petróleo se llega a estabilizar favorablemente en comparación con el primer periodo ($m=0.63$ y 1,28).

El 8 de septiembre del 2017 y el 9 de febrero del 2018, se realizan una segunda y una tercera rehabilitación de pozos respectivamente para los cuales se utilizó un diseño de fluido de estimulación matricial ácida aumentando la cantidad del polímero para el control de arcillas (Composición de fluido II, y III).

En este segundo escenario, la producción de petróleo aumenta significativamente (1000 bbl/día), sin embargo, dura muy poco tiempo ya que se observa una declinación brusca ($m = 7.73$), por lo cual se llega a la conclusión de que el mecanismo de daño continúa presente en el reservorio luego de la estimulación matricial (migración de finos), (Halliburton, 2019).

Por lo que en el periodo de Agosto del 2018, se bombea nuevamente el mismo fluido de estimulación, pero esta vez enviando cantidades del fluido mayores, observando que la producción mantiene una declinación menor ($m = 0.07$) durante aproximadamente 7 meses, sin embargo, la declinación incrementa conforme el corte de agua lo hace por lo que se evidencia que la migración de finos es un problema que se puede controlar durante un periodo de tiempo determinado, pero no se puede eliminar definitivamente (Civan, 2000), Figura 2.

Caso 2

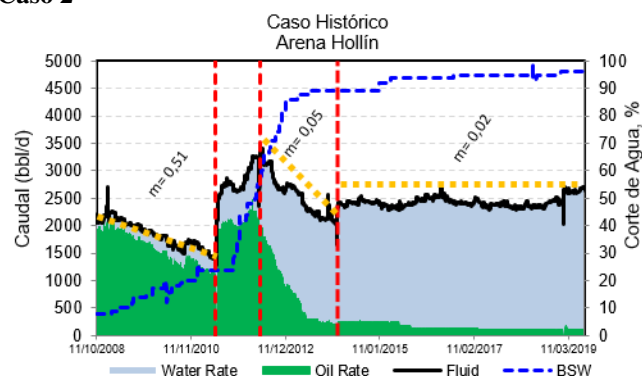


Figura 2. Caso 2 de Producción Campo de estudio

Este segundo caso muestra una situación diferente al previo, observa una declinación de la producción menor ($m=0.51$) en aproximadamente 2 años conforme aumenta el corte de agua, se procede a realizar un reacondicionamiento con el objetivo de restaurar la producción, sin embargo, al cabo de un año el corte de agua aumenta hasta un 90% por lo que la producción declina rápidamente.

A partir de este punto, observamos que la producción de fluido se mantiene constante, es decir no aumenta ni disminuye ($m=0.02$) por lo que se puede concluir que ya han sido drenados todos los finos de migración; es decir ya no existe más arcillas que migrar a este punto.

Es importante recalcar que en este estado de producción ya es muy difícil realizar un tratamiento de remediación, es posible tratar de llegar a este estado en un periodo temprano con el objetivo de estabilizar la producción a través de los modificadores de permeabilidad relativa (Díaz et. al, 2009), sin embargo, toda acción de remediación se la debería realizar mucho antes.

3.2. Geología

El reservorio primario corresponde a una secuencia clástica de la formación cretácea Hollín (Leal, Gaibor, Garces, & Benalcazar, 2015). La formación de Hollín incluye sedimentos fluviales marinos, dominados por mareas y poco profundos, que presentan diferentes características petrofísicas relacionadas con el entorno de deposición y diagénesis. La formación de Hollín se subdivide en dos miembros informales: Hollín Inferior y Hollín Superior. (Leal et al., 2015)

3.2.1 Ambientes Sedimentarios

Los ambientes de depositación son de vital importancia debido a que con ellos podemos conocer acerca de la sedimentología, depositación, facies y mineralogía de los diferentes reservorios de nuestro interés.

La formación Hollín se puede subdividir en dos miembros informales: Hollín Inferior y Hollín Superior. Sin embargo, desde la perspectiva sedimentológica, se han definido tres entornos de depósito: fluvial, mareal y estuarino (Rodríguez et al. 2014, Sandoval et al. (2015), y Leal et al. 2015), estos se describen a continuación:

3.2.2 Sistema Fluvial

Depósitos Fluviales (también conocidos como Aluviales), abarca una amplia gama de sedimentos generados por la actividad de ríos, arroyos, y procesos de flujos asociados con la gravedad. Este tipo de sistemas ocurre en el presente bajo una variedad de condiciones climáticas y en diferentes ambientes tales como: desiertos, regiones húmedas y glaciales (Boggs, 2006).

3.2.3 Sistema Estuarino

Dalrymple, Zaitlin, and Boyd (1992) definen a un estuario como “La porción de mar adentro de un sistema de valles que reciben sedimentos de fuentes marinas como fluviales, en la cual contienen facies influenciadas por la marea, olas y procesos fluviales”.

3.2.4 Sistema Marino Somero

Las líneas costeras no deltaicas reciben su suministro de sedimentos de una variedad de fuentes. Por ejemplo, los sedimentos pueden depositarse temporalmente en las desembocaduras de los ríos y luego ser recogidos y movidos a lo largo de la costa por olas y corrientes para formar playas. Además, los sedimentos pueden recogerse en el lecho marino y desplazarse hacia tierra, nuevamente para formar depósitos en la playa. En general, existe un transporte neto de arena en tierra, desde el fondo marino hasta la costa. Este transporte terrestre neto se produce debido al movimiento hacia el interior del agua por las olas generadas por el viento y las corrientes cercanas a la costa (Slatt, 2006).

3.3 Verificación

Al tener un indicio del problema se procedió a verificar la información antes analizada, para ello se tomó los datos arrojados de las pruebas de difracción de rayos X que mostraron la presencia de mineralogía específica, además se analizó las imágenes de láminas delgadas y por último se tomó los datos de un registro de rayos gamma espectral que sirvió para corroborar la presencia de ciertos minerales de manera cualitativa. Dentro de la base de datos se encontró una prueba de velocidad crítica que ayudó a entender el comportamiento de la producción con respecto a la permeabilidad.

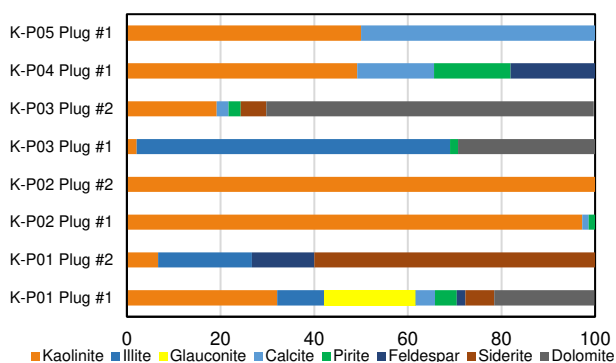


Figura 3. Mineralogía Arena Hollín de los principales campos de la Cuenca Oriente

Las principales arcillas que se encuentran en las diferentes muestras analizadas son Caolinita e illita, conocidas como

arcillas de migración (intercambio de iones) las cuales son las causantes de pérdida de permeabilidad del reservorio (Civan, 2000), lo que se ve reflejado en una disminución en la producción, Figura 3.

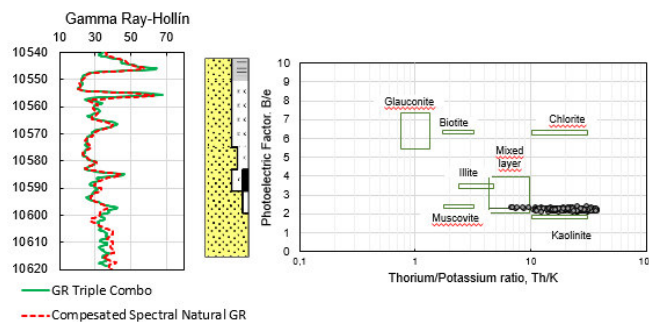


Figura 4. Rayos gamma, Registro litológico, y Análisis del Registro eléctrico para la arena Hollín del campo de estudio

Para la detección y comprobación de los minerales expuestos en las pruebas de difracción de rayos X se utilizó registros eléctricos, la curva de rayos gamma y los registros litológicos, Figura 4, se tomó datos de la curva de rayos gamma del campo de estudio para un ambiente fluvial de donde proviene la caolinita e illita (Slatt, 2006), el gráfico de factor fotoeléctrico vs la relación torio-potasio obtenido de los registros eléctricos del campo de estudio, muestra que el mineral que abunda en mayor cantidad es la caolinita.

3.4 Análisis de posibles soluciones

Una vez identificado el problema con el reservorio Hollín se procedió a recomendar tratamientos, para esto se tomó los datos de las diferentes pruebas de retorno de permeabilidad para sistemas ácidos, sistema de estabilización de finos, y modificadores de permeabilidad relativa, además se toman los datos de fluidos de control como método de prevención para la migración de finos.

Pruebas de Retorno de Permeabilidad

Una prueba de retorno de permeabilidad puede revelar daños en la formación, y se realiza utilizando un permeámetro de retorno. La porosidad y la permeabilidad de una muestra de núcleo se determinan haciendo fluir un aceite mineral refinado a través del núcleo. Para simular la invasión de fluido y filtrado en el núcleo, el fluido de reacondicionamiento se coloca contra el lado de salida del núcleo y la presión diferencial se aplica en la dirección opuesta a la de la medición de flujo anterior. Después de la contaminación, el aceite mineral fluye a través del núcleo en la dirección original y la porosidad resultante se compara con la porosidad original para determinar si se ha producido una reducción en la permeabilidad (Wilcox, Fisk, & Corbett, 1987).

4. RESULTADOS

4.1 Técnicas para la prevención en la migración de Finos

4.1.1 Fluidos de Control

La pérdida de fluidos de terminación hacia el reservorio puede generar migración de finos si este no se formula con salinidad

igual o mayor a la del yacimiento existirá intercambio iónico entre el fluido de control y el de reservorio provocando migración de finos durante las operaciones de terminación o reparación. Este fenómeno se observa en la Figura 5 donde los fluidos de control 6,7,8 y 9 no generan daño de formación y las demás formulaciones provocan una pérdida de permeabilidad de hasta el 8% (Eoff & Waltman, 2009).

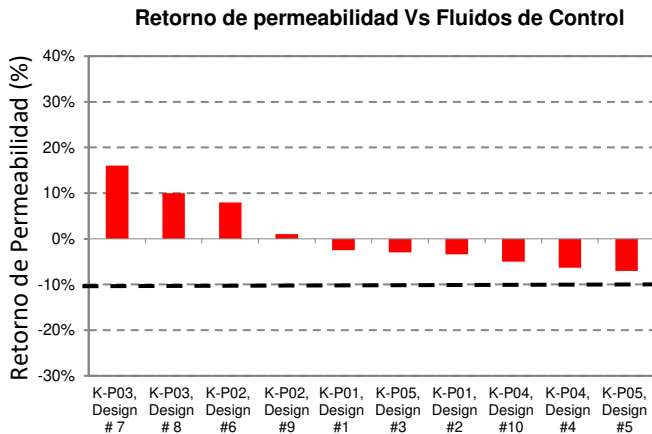


Figura 5. Resultados de pruebas de retorno de permeabilidad para fluidos de control

De acuerdo con los resultados obtenidos, existen retornos de permeabilidad del 15% y una pérdida de permeabilidad de hasta el 9 % lo cual es aceptable para los diferentes diseños de fluidos de control.

Es importante mantener en observación las cantidades de aditivos que van a ser enviados con el fluido de control (solventes mutuales y surfactantes) ya que dosis inadecuadas, podrían desestabilizar el sistema (Economides & Nolte, 2000) y provocar migración de finos.

4.2 Técnicas para el control de Finos

4.2.1 Estimulación Ácida

La estimulación ácida consiste en inyectar una solución ácida para disolver minerales como arcillas y feldespatos en la formación, que causan la migración de finos (Syed et al.,2016) , Figura 6.

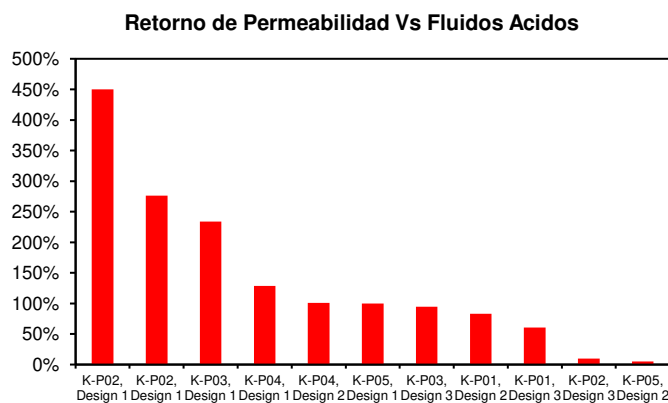


Figura 6. Resultados de pruebas de retorno de permeabilidad para sistemas ácidos

Para todas las pruebas realizadas se obtuvo resultados de retorno de permeabilidad positivos de hasta el 450% de retorno, con lo cual se comprueba que la estimulación ácida está totalmente recomendada para la arena Hollín.

4.2.2 Fluido Estabilizador de Finos

Los químicos utilizados para estabilizar las arcillas y los finos funcionan al ser adsorbidos, generalmente por atracción electrostática o intercambio iónico, en el reservorio de interés. Debido a que los silicatos tienen una carga negativa, el estabilizador más efectivo tiene una carga positiva (catiónica). Los estabilizadores de arcilla comunes son cationes altamente cargados, surfactantes cuaternarios, poliaminas, aminos policuaternarios y silanos orgánicos (Economides & Nolte, 2000).

A velocidades de fluido suficientemente bajas las partículas finas permanecen unidas a la superficie del poro, cuando aumenta la velocidad del fluido existe una velocidad crítica donde comienza el desprendimiento de partículas por las fuerzas hidrodinámicas (Civan,2000), por lo tanto, la permeabilidad disminuye continuamente por la migración de finos que se acumulan.

Para demostrar el funcionamiento del tratamiento se realizó una prueba de velocidad crítica, Figura 7.

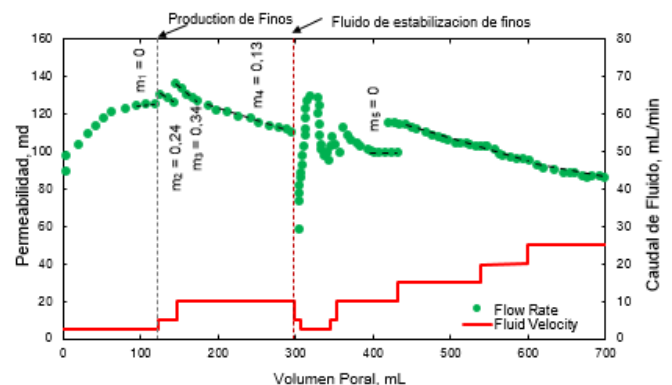


Figura 7. Prueba de velocidad crítica

Una vez que se determina la velocidad crítica de 10 ml/ min, se bombea el fluido estabilizador de finos y observamos una variación de la permeabilidad hasta que alcanza la velocidad de 10 ml / min ($m = 0$), donde observamos que la permeabilidad permanece constante, es decir no hay pérdida de permeabilidad, inclusive se logra aumentar la velocidad del fluido hasta 25 ml/min y no se observan cambios drásticos en la permeabilidad demostrando que el fluido estabilizador de finos funcionó.

Para un correcto diseño del tratamiento ácido se debe acondicionar la matriz con pre-flujos acuosos y ácidos con los que se evita que el ácido fluorhídrico tenga contacto con material calcáreo y el intercambio iónico con fluidos reservorio, luego bombea el sistema ácido principal para disolver los finos de migración, y finalmente se bombea el estabilizador de finos con el objetivo de que actúe en la cara de la formación y atrape aquellos finos que pudieran migrar en un futuro.

4.2.3 Modificadores de Permeabilidad relativa

La fracción de agua es importante porque es directamente proporcional a la migración de finos (Civan,2000), con los RPM se busca alterar la curva de flujo fraccional. Si se atrapa una partícula de agua en la garganta poral, no permitirá que la partícula polar del aceite se adhiera al fino y la libere, por lo tanto, el sistema está incompleto para que se dé la migración de finos (García et al.,2008) , Figura 8.

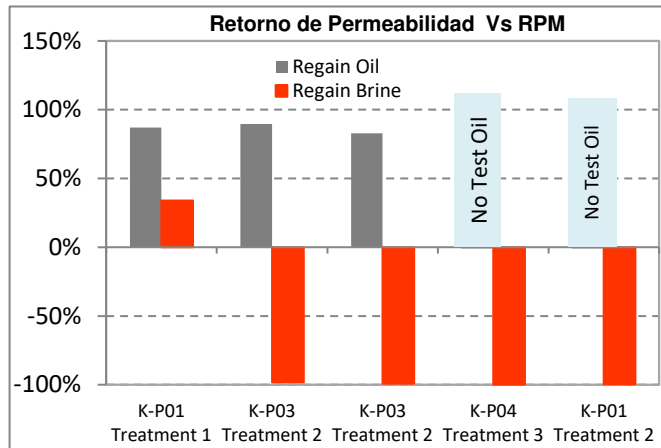


Figura 8. Resultados de pruebas de retorno de permeabilidad para modificadores de permeabilidad relativa

La acción de los modificadores de permeabilidad relativa los cuales buscan atenuar el incremento de corte de agua en el tiempo fue satisfactoria, ya que los resultados muestran un retorno permeabilidad de 0% al agua.

4.2.4 Otros métodos: Fractura Hidráulica y métodos combinados.

Cuando se fractura un pozo se tiene como objetivo disminuir el diferencial de presión ($\Delta P = P_r - P_{wf}$), con ello se busca aumentar el índice de productividad, cada vez que se aumenta el índice de productividad, disminuye la velocidad intersticial del reservorio, entonces se produce más por debajo de la velocidad crítica. Entonces como se produce mucho más y el pozo está fracturado, no se tiene el término de turbulencia, debido a que la caída de presión y la velocidad crítica también disminuirán, si no se tiene turbulencia dentro del reservorio, los finos no migrarán taponando las gargantas porales (Economides & Nolte,2000).

Si la velocidad intersticial es menor a la velocidad crítica no hay desprendimiento de finos (Civan,2000). El apuntalante brindará una mayor permeabilidad ya que este da la oportunidad de crear diámetros porales más amplios por donde los finos cruzarán sin quedarse atrapados y finalmente el uso del estabilizador de finos y los modificadores de permeabilidad relativa, combinados con la fractura crea una barrera adicional para la migración finos (Songire et al., 2014).

4.2 Criterios de Selección

Los criterios que se debe tomar en cuenta a la hora de seleccionar un tratamiento para el reservorio son: el índice de productividad, producción y tiempo, Figura 9.

La estimulación ácida da un IP alto, sin embargo la producción va a disminuir rápidamente por lo tanto el tiempo de intervenciones es constante; el estabilizador de finos da un IP bajo, sin embargo la producción no declina rápidamente y los tiempos de intervención del tratamiento son largos; los modificadores actúan de igual manera que los estabilizadores de finos sin embargo el tiempo de intervención es mucho más corto; y por último la fractura hidráulica y métodos combinados me ofrecen IP altos en ambos casos la diferencia radica en los tiempos de intervención, depende de lo que la empresa operada necesite.



Figura 9. Criterio de Selección para los tratamientos de Control de Finos

4. CONCLUSIONES

El análisis mineralógico, ambiente depositacional y los registros eléctricos muestran al reservorio Hollín como una arena limpia, que eventualmente puede tener hasta un 40% de minerales distintos al cuarzo, entre ellos arcillas como caolinita e illita.

La caolinita e illita (arcillas de migración), se desplazan al exponerse a fluidos de baja salinidad provocando un taponamiento de las gargantas porales lo cual provoca una disminución de permeabilidad en el reservorio.

Los casos históricos estudiados de producción y de velocidad crítica exponen un declive de producción conforme aumenta el corte de agua, debido a la diferencia de concentración de salinidad, provocando la migración de finos.

Entre los tratamientos químicos estudiados para mitigar el daño de formación por migración de finos se encuentran: estimulación ácida, agentes estabilizadores de finos, modificadores de permeabilidad relativa, fractura hidráulica y fracturamiento hidráulico combinado con agentes estabilizadores de finos.

En el caso de las pruebas de retorno de permeabilidad para fluidos ácidos se observa un efecto positivo en los diferentes escenarios, ya que se conserva la permeabilidad hasta un 400%; sin embargo, este tratamiento se debe mantener durante la vida productiva del pozo para que los niveles de producción sean rentables.

La acción de los modificadores de permeabilidad relativa los cuales buscan atenuar el incremento de corte de agua en el tiempo fue satisfactoria ya que los resultados muestran una permeabilidad reganada de 0% al agua.

Con el tratamiento de estabilización de finos la declinación en la producción disminuye, y el tiempo de acción es duradero, sin embargo, el índice de productividad también se ve afectado.

El fracturamiento hidráulico es uno de los métodos en los que tenemos índices de productividad, y tiempos de duración muy altos que nos proporcionan una extensa recuperación en producción.

Al combinar fractura hidráulica con agentes estabilizadores de finos, se incrementa el índice de productividad y se logra prolongar la vida productiva del pozo.

REFERENCIAS

- Ahmed, T. (2001). Reservoir Engineering Handbook. In Reservoir Engineering Handbook (2nd ed.). Houston: Texas. 70-75, 130, 245-250, 266, 275.
- Atahualpa, G., & Trujillo, B. (2013). Efecto de la Glauconita en las propiedades petrofísicas del reservorio arenisca "T" superior del bloque Tarapoa. Universidad Central del Ecuador. Quito: Ecuador, 70-80. Obtenido de: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/T-UCE-0012156.pdf
- Baby, P., Rivadeneira, M., & Barragán, R. (2014). La Cuenca Oriente: Geología Y Petróleo. (3era ed.), 415.
- Boggs, S. (2006). Principles of sedimentology and Stratigraphy. New Jersey: Estados Unidos, 300.
- Boyd, R., Dalrymple, R.W. & Zaitlin, B.A. (1992) Classification of clastic coastal depositional environments. Sedimentary Geology, 80, 139–150. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90037-R](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90037-R)
- Catuneanu, O. (2006). Principles of Sequence Stratigraphy (1era ed.). Canada: Alberta. 15-17, 156.
- Chafetz, H. S., & Reid, A. (2017). Syndepositional shallow-water precipitation of glauconitic minerals Syndepositional shallow-water precipitation of glauconitic minerals. 38-39. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00082-8)
- Civan, F. (2000). Reservoir Formation Damage. (1era ed.). Houston: Texas: Gulf Publishing Company. 150-155, 232-235, 255-266.
- Danna, J. (2006). Manual de Mineralogía. (2da ed.), 2, 30-48. España: Madrid Obtenido de: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-catolica-del-norte/mineralogia/otros/manual-de-mineralogia-dana-hurlbut-2a-edicion-geo-libros-pdf/5114231/view>
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. & Boyd, R. (1992) Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. Journal of Sedimentary Petrology, 62, 1130–1146.
- Díaz, G., Castillo, P., Villa, K., Sanchez, L., Mucci, M., Robles, J., ... Peacock, H. (2009). Fracture conformance treatments using RPM: Efficiency and durability evaluation. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference Proceedings, 3, 1279–1289. <https://doi.org/10.2118/122913-MS>
- Economides, M. J., & Nolte, K. G. (2000). Reservoir Stimulation (3era ed.; E. Kapitan, Ed.). Texas: John Wiley & Sons Ltd.
- Eoff, L., & Waltman, B. (2009). Polymer Treatment Controls Fluid Loss While Maintaining Hydrocarbon Flow. JPT, 61(7), 3. <https://doi.org/10.2118/0709-0028-JPT>
- Freed, R. (1976). Clay Diagenesis and Abnormally High Fluid Pressure. 4–6. SEG-1982-0505
- García, B., Soriano, J. E., Chacon, W., & Eoff, L. S. (2008). Novel Acid-Diversion Technique Increases Production in the Cantarell Field, Offshore Mexico. 1–15. <https://doi.org/10.2118/112413-ms>
- Halliburton. (2019). Production Enhancement Ecuador Stimulation Handbook (p. 450). p. 450. Ecuador.
- Johnson, C. L., Stright, L., Purcell, R., & Durkin, P. (2017). Stratigraphic evolution of an estuarine fill succession and the reservoir characterization of inclined heterolithic strata, Cretaceous of southern Utah, USA. Geological Society, London, Special Publications, 444(1), 251–286. <https://doi.org/10.1144/SP444.1>
- Leal, J., Gaibor, J., Garces, S., & Benalcázar, E. (2015). New Approaching for Rock Types and Lithofacies Synergy for the Hollin Formation, Palo Azul Field, Ecuador. 2-3. <https://doi.org/10.2118/177156-ms>
- Morrow, D. W. (1982). Diagenesis 1. Dolomite - Part 1: The Chemistry of Dolomitization and Dolomite Precipitation. Geoscience Canada, 9(1). Obtenido de: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3279>
- Reinoso, W., Torres, F., Aldana, M., Campo, P., Alvarez, E., & Tovar, E. (2016). Removing Formation Damage From Fines Migration in the Putumayo Basin in Colombia: Challenges, Results, Lessons Learned, and New Opportunities after More Than 100 Sandstone Acidizing Treatments. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/178996-MS
- Rodríguez, M., Abad, F., Rodríguez, L., Gaibor, J., Moran, M., & Verdezoto, A. (2015). Application of Modern Reservoir Characterization in Mature Fields to Unravel Hidden Reserves. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/177195-ms>
- Sandoval, J., Gaibor, J., Benalcázar, E., & Jiménez, L. (2015). State of the Art in 3D Reservoir Characterization: Palo Azul Field, Ecuador. Society of Petroleum Engineers. 18–20. <https://doi.org/10.2118/177148-ms>
- Schechter, R. S. (1992). Oil well stimulation improved. In Hart's E and P: New Jersey. 125-130, 136.
- Slatt, R. M. (2006). Stratigraphic Reservoir Characterization for Petroleum Geologists, Geophysicists and Engineers. (J. Cubitt, Ed.). Obtenido de: www.academia.edu
- Songire, S., Uppuluri, R., & Rama, M. S. (2014). Aqueous-Based Surface Modifying Agent for Mitigation of Fines Migration. Society of Petroleum Engineers, 12–14. <https://doi.org/10.2118/172273-MS>
- Syed, A., Kalfayan, L., & Montgomery, C. (2016). Acid Stimulation (26ava ed.). Society of Petroleum Engineers.
- Thompson, G. R., & Hower, J. (1975). The Mineralogy Of Glauconite. 23, 289-300. Great Britain. Obtenido de: <http://www.clays.org/journal/archive/volume%2023/23-4-289.pdf>
- Triplehorn, D. M. (1965). Origin and Significance of Glauconite in the Geologic Sequence: Abstract. 33, 282–283. Obtenido de: http://archives.datapages.com/data/tgs/digest/data/033/033001/282_tgs330282a.htm
- Vasquez, J., Waltman, B., & Eoff, L. (2010). Field implementation of a novel solids-free system to minimize fluid loss during overbalanced workover operations. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/130210-MS>
- Wilcox, R. D., Fisk, J. V., & Corbett, G. E. (1987). Filtration Method Characterizes Dispersive Properties of Shales. SPE Drilling Engineering, 2(02), 149–158. <https://doi.org/10.2118/13162-PA>

BIOGRAFÍAS



Mayra Jizbell Ruilova Zambrano, Ingeniera de Petróleos de la Universidad Central del Ecuador (2019). Realizó prácticas preprofesionales en diversas empresas como Halliburton (2018) Y Repsol Ecuador S.A (2019). Colaboró en un proyecto interno para el Departamento de Desarrollo de Yacimientos de la compañía Repsol S.A. (2019). Participó como expositor en el evento Next Wave Paper Contest 2019 de la SPE

Sección Ecuador siendo acreedora del segundo lugar. Actualmente se desempeña como ingeniera en entrenamiento para Schlumberger.



Álvaro Javier Izurieta Ballesteros, Ingeniero en Petróleos, Escuela Politécnica Nacional (2010), Especialista Industria Petroquímica, Universidad Nacional General San Martín (2017) se desempeña actualmente como Asesor Técnico para Halliburton. Sus intereses son

la optimización de producción mediante fracturamiento hidráulico, estimulación ácida, ingeniería de producción de petróleo e ingeniería de producción. Es autor y coautor de varios estudios técnicos para la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE) y Congreso Mexicano del Petróleo (CMP).

Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

Apellido, Nombre¹; Apellido, Nombre²

¹Institución, Departamento o Facultad del Autor Principal, Ciudad, País

²Institución, Departamento o Facultad del Autor 2, Ciudad, País

Resumen: Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15. Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica (revistapolitecnica.epn.edu.ec). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

Palabras clave: Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

Title of Manuscript

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website(revistapolitecnica.epn.edu.ec).

Keywords:Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo electrónico, **revistapolitecnicaformato2020.docx**. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor comunicarse con la coordinación de edición (epnjournal@epn.edu.ec). Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.

No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas. Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta manera tener una buena estimación de la longitud del artículo

a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación, se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

3. SECCIÓN III

3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato png, con al

menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am⁻¹)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.

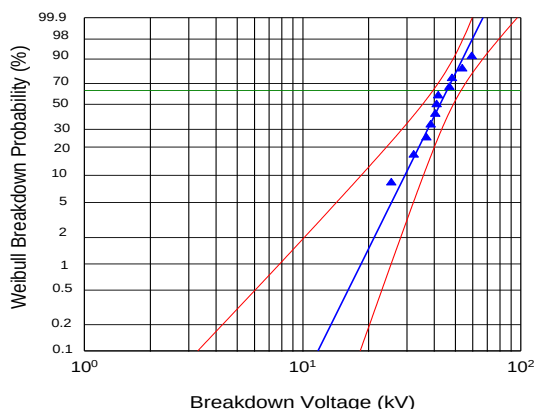


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura de cables $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está creando un documento por su cuenta, considere los márgenes

que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en **centímetros**.

Tabla 1. Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1)"

3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm² (100 Gb/in²)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oerstedios. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético es A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como $\mu_0 H$. Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A · m²".

3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.

- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

REFERENCIAS

La lista de **referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente** de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

• Libros con un autor:

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

• Libros con dos autores:

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

• Libros con dos o más autores:

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

• Artículos en revistas:

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

• Artículos con DOI

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

• Artículos sin DOI

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos Academic Research Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

• Artículos en línea

En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

BIOGRAFÍA

Mini biografía del primer autor con un máximo de 100 palabras.

Fotografía
actualizada
del autor

Fotografía
actualizada
del autor

Mini biografía del segundo
autor con un máximo de 100
palabras.

INDEXACIONES



Matriz de Información para el
Revistas



revistapolitecnica.epn.edu.ec





revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec