

**Aplicación del software CETAGUA para la optimización del  
tratamiento de fluido de perforación, Oriente Ecuatoriano**

**CETAGUA software application for the optimization of drilling fluid  
treatment, Oriente Ecuatoriano**

**Aplicação de software CETAGUA para a otimização do tratamento de  
fluidos de perfuração, Oriente Equatoriano**

Duran Mera, Bryan Esteven  
Universidad Estatal Península de Santa Elena  
[bryan.duranmera5787@upse.edu.ec](mailto:bryan.duranmera5787@upse.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-2532-3928>



Tenicota García, Alex Giovanni  
Universidad Estatal Península de Santa Elena  
[atenicota@upse.edu.ec](mailto:atenicota@upse.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0707-7698>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n2/590>

**Como citar:**

Duran Mera, B. E., & Tenicota García, A. G. (2024). Aplicación del software CETAGUA para la optimización del tratamiento de fluido de perforación, Oriente Ecuatoriano. Código Científico Revista De Investigación, 5(2), 1398–1416. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n2/590>.

**Recibido:** 25/11/2024

**Aceptado:** 13/12/2024

**Publicado:** 31/12/2024

## Resumen

El presente estudio evaluó la efectividad del software CETAGUA en la optimización del tratamiento de fluidos de perforación en los pozos petroleros del Bloque 58 en Sucumbíos, Ecuador. Se compararon cuatro tratamientos: uno testigo mediante la prueba de jarras y tres calibraciones del software CETAGUA (75%, 50%, y 25%). Los análisis revelaron que el software CETAGUA permitió reducir significativamente el tiempo de tratamiento hasta en un 81.84%, mejorando la velocidad de sedimentación en todos los casos. Sin embargo, se registró un aumento considerable en la turbidez del agua tratada, lo que sugiere una floculación deficiente. Además, el uso de polímeros incrementó en los tratamientos con el software, lo que si bien optimizó algunos procesos, también podría elevar los costos y afectar la sostenibilidad del método a largo plazo. Las conclusiones subrayan la necesidad de ajustar las calibraciones del software para equilibrar la eficiencia operativa con la calidad del agua tratada.

**Palabras clave:** análisis estadístico, calibración, fluidos de perforación, software, turbidez, tratamiento de agua.

## Abstract

The present study evaluated the effectiveness of the CETAGUA software in optimizing the treatment of drilling fluids in the oil wells of Block 58 in Sucumbíos, Ecuador. Four treatments were compared: a control treatment using the jug test and three calibrations of the CETAGUA software (75%, 50%, and 25%). The analyses revealed that the CETAGUA software significantly reduced the treatment time by up to 81.84%, improving the sedimentation rate in all cases. However, there was a considerable increase in the turbidity of the treated water, suggesting poor flocculation. In addition, the use of polymers increased in the software treatments, which while optimizing some processes, could also raise costs and affect the long-term sustainability of the method. The conclusions highlight the need to adjust software calibrations to balance operational efficiency with treated water quality.

**Keywords:** statistical analysis, calibration, drilling fluids, software, turbidity, water treatment.

## Resumo

Este estudo avaliou a eficácia do software CETAGUA na otimização do tratamento de fluidos de perfuração em poços de petróleo no Bloco 58 em Sucumbíos, Equador. Foram comparados quatro tratamentos: um tratamento de controlo utilizando o teste do jarro e três calibrações do software CETAGUA (75%, 50% e 25%). As análises revelaram que o software CETAGUA reduziu significativamente o tempo de tratamento em até 81,84%, melhorando a taxa de sedimentação em todos os casos. Entretanto, houve um aumento considerável da turbidez da água tratada, sugerindo uma floculação deficiente. Além disso, a utilização de polímeros aumentou nos tratamentos por software, o que, embora optimize alguns processos, pode também aumentar os custos e afetar a sustentabilidade do método a longo prazo. As conclusões sublinham a necessidade de ajustar as calibrações do software para equilibrar a eficiência operacional com a qualidade da água tratada.

**Palavras-chave:** análise estatística, calibração, fluidos de perfuração, software, turbidez, tratamento de água.

## **Introducción**

La exploración y explotación de recursos energéticos en la región del Oriente Ecuatoriano ha sido una actividad central en la economía del país durante décadas (Amores et al., 2020). Esta región, conocida por su abundante biodiversidad y su rica selva amazónica, ha experimentado un desarrollo industrial significativo, especialmente en la industria petrolera (Jaramillo, 2019). Desde los primeros días de la exploración petrolera en Ecuador, la perforación de pozos ha sido una práctica común en el Oriente, impulsando la economía y generando empleo en la región (Arauz, 2022).

El hito más significativo en la historia de la industria petrolera del Oriente Ecuatoriano fue la perforación del pozo Lago Agrio 1 en 1967, marcando el inicio de una nueva era en la explotación de recursos petroleros y estableciendo la infraestructura necesaria para la extracción y procesamiento del petróleo (Yáñez et al., 2023). A lo largo de los años, numerosos pozos han sido perforados, alimentando la producción petrolera del país y contribuyendo sustancialmente a su economía (Arauz, 2022).

No obstante, el desarrollo de la industria petrolera en el Oriente Ecuatoriano ha traído consigo desafíos ambientales significativos. La extracción de petróleo implica riesgos como la contaminación del suelo y del agua, la deforestación y la pérdida de biodiversidad (Herrera, 2024). Además, los procesos de perforación y producción generan una considerable cantidad de residuos, incluidos los fluidos de perforación (Soroa et al., 2021). Estos fluidos son esenciales para la lubricación de la broca y la estabilidad del pozo, pero contienen compuestos químicos peligrosos que, si no se manejan adecuadamente, pueden causar contaminación de aguas subterráneas y superficiales, así como la degradación de ecosistemas naturales (Herrera, 2020).

Para mitigar estos impactos ambientales y mejorar la eficiencia operativa, se han implementado diversas estrategias tecnológicas. Una de las innovaciones más recientes es el

software de la Corporación Ecuatoriana de Tratamiento de Agua (CETAGUA S.A.), un programa privado en estado de prueba que utiliza datos estadísticos de laboratorio para monitorear y controlar el tratamiento de fluidos de perforación mediante la recepción y análisis en tiempo real de parámetros químicos clave, como pH, TSS y  $SO_4$ . Utilizando algoritmos avanzados y modelos matemáticos, simula procesos de coagulación, floculación y sedimentación para determinar la dosificación óptima de químicos. Además, ajusta automáticamente las dosis para maximizar la eficiencia del tratamiento y minimizar costos, generando reportes detallados y validando resultados en comparación con límites permisibles establecidos.

El software CETAGUA busca ser una herramienta invaluable para la industria petrolera en el Oriente Ecuatoriano, permitiendo a las empresas mejorar la eficiencia de sus procesos, reducir costos operativos y mitigar los efectos ambientales adversos de sus actividades. Esta innovación no solo aborda los desafíos técnicos de la gestión de fluidos de perforación, sino que también contribuye a un desarrollo más sostenible y responsable de la industria petrolera en la región. Por esta razón se decide estudiar la optimización de los procesos de tratamiento de fluidos de perforación utilizando el software CETAGUA mediante un análisis de eficiencia de tiempos y recursos materiales.

### **Metodología**

El estudio se llevó a cabo en los pozos petroleros dentro del Bloque 58, ubicado en la parroquia Sansahuari, Provincia de Sucumbíos, operado por PETROECUADOR. Para esto se contó con la colaboración de personal especializado del área de tratamiento de efluentes líquidos de CETAGUA S.A., los cuales permitieron el acceso a las primeras versiones del software en estudio, el cual se centra en los procesos de cálculo de químicos utilizados para las fases de coagulación, floculación y sedimentación de los efluentes.

Los análisis químicos se llevaron a cabo en el departamento de Tratamiento Químico de PETROECUADOR el cual se encuentra ubicado en las inmediaciones de los pozos petroleros. Para efectos de cumplimiento y control de los parámetros de descarga de agua, CETAGUA S.A. cuenta en campo con un laboratorio equipado con la instrumentación necesaria (potenciómetro marca Oakton; conductivímetro, espectrofotómetro y turbidímetro marca HACH) para realizar los análisis requeridos. Toda el agua procedente del *Dewatering* (deseccación), canales perimetrales y contra-pozo, es tratada para poder ser evacuada al sistema de reinyección teniendo en cuenta los siguientes parámetros y límites permisibles (Tabla 1):

**Tabla 1***Parámetros requeridos para evacuación de agua tratada*

Parámetros	Expresado en	Unidad	Valor límite permisible
Potencial Hidrógeno	pH		6<pH<8
Sólidos Totales en Suspensión	TSS	mg/l	<60
Turbidez	Unidad nefelométrica de turbidez	NTU	<30
Bario (Ba)	-	mg/l	<7
Calcio (Ca)	-	mg/l	<500
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	-	mg/l	<3000

*Nota:* Departamento de Seguridad, Salud y Ambiente (SSA) PETROECUADOR.

La Tabla 1 presenta los parámetros requeridos para la evacuación de agua tratada, especificando límites permisibles en términos de calidad. Los valores destacan la importancia de mantener el pH dentro del rango 6–8, lo cual es esencial para evitar condiciones ácidas o alcalinas que puedan perjudicar el medioambiente. Los Sólidos Totales en Suspensión (TSS) deben ser menores a 60 mg/l, lo que asegura una baja carga de partículas en el efluente. En cuanto a la turbidez, el límite de <30 NTU busca garantizar una claridad aceptable en el agua tratada, reduciendo el impacto visual y de sedimentación en el ecosistema receptor.

Por otro lado, los límites permisibles para los elementos químicos incluyen un máximo de 7 mg/l de bario (Ba), lo que previene la toxicidad en sistemas acuáticos. Asimismo, el calcio (Ca) se limita a 500 mg/l, previniendo la formación de depósitos calcáreos, y el sulfato (SO<sub>4</sub>) no debe superar los 3000 mg/l, evitando problemas de corrosión o acumulación en los sistemas de descarga. Estos parámetros reflejan un equilibrio entre las demandas de eficiencia operativa en

el tratamiento y los estándares ambientales, fundamentales para proteger los cuerpos de agua receptoras.

### Fase experimental

Las muestras y los datos experimentales fueron tomados en distintos pozos dentro del Bloque 58 del mes de marzo a julio 2024, teniendo un dato semanal para un total de 12 datos para su análisis. Se tomaron en cuenta cuatro tratamientos en estudio, donde el testigo correspondió a la prueba de jarras comúnmente utilizada por el técnico encargado, mientras que los Software C1, C2 y C3 corresponden a distintos niveles de calibración de la aplicación para el cumplimiento de los valores límite permisibles.

**Tabla 2**

*Tratamientos en estudio*

Tratamiento	Descripción
Testigo	Prueba de jarras
Software C1	Software CETAGUA, calibrado al 75%
Software C2	Software CETAGUA, calibrado al 50%
Software C3	Software CETAGUA, calibrado al 25%

*Nota:* Autores (2024).

Para la prueba de jarras se siguieron los pasos descritos por Pozo (2015) con su debida adaptación según la guía del técnico encargado de CETAGUA S.A., donde se utilizó sulfato de aluminio al 4% ( $Al_2SO_4$ ), polímero CYFLOC 1146 al 0,1% (Polímero), cal hidratada al 3% (Cal), policloruro de aluminio (PAC) y HINA X. Estos compuestos fueron agregados en distintas cantidades hasta que el técnico determinó que los procesos de coagulación, floculación y sedimentación permitieron observar una mayor claridad en el agua con la cual se volvieron a analizar los parámetros descritos en la Tabla 1, en caso de incumplir con los límites se volvieron a agregar cantidades menores de los químicos.

Por otro lado, los tratamientos con el software CETAGUA fueron calibrados para lograr un cumplimiento aproximado del 75%, 50% y 25% de los parámetros (Tabla 1), luego se introdujeron los valores de los parámetros químicos del análisis del agua para que se realicen

los correspondientes cálculos, se agregaron las medidas resultantes y se esperó a que se cumplan los procesos de coagulación, floculación y sedimentación.

Para todos los tratamientos se consideraron las variables: tiempo (en segundos), cronometrando desde el inicio de la prueba de jarras hasta el cumplimiento de los límites para el testigo; mientras que, para las calibraciones del software se cronometró desde el llenado de datos hasta que el cumplimiento de los límites. También las variables dosis (en mililitros [ml]) de  $Al_2SO_4$ , Polímero, Cal, PAC y HINA X; límites (en porcentaje [%]), de pH, TSS, Turbidez, Ba, Ca y  $SO_4$ ; así como la Velocidad de sedimentación (en centímetros por segundo [cm/s]) mediante una regla colocada junto a un vaso de precipitación.

Los datos fueron recolectados en una hoja de Excel para posteriormente analizarlos mediante el uso del software estadístico IBM SPSS Statistics 29.0.

### **Análisis estadístico**

Se emplearon análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos relacionados con las distintas variables en estudio, en caso de presentar diferencia significativa (Sig. <0.05) se realizó una prueba de Tukey al 5% para evidenciar las diferencias entre las medias de los tratamientos. Además, se determinó la eficiencia en porcentaje (%) de los tratamientos relacionados al software CETAGUA frente al testigo, en cuanto a los datos numéricos de las variables en estudio, mediante la siguiente fórmula:

$$Eficiencia (\%) = \left( \frac{Tratamiento - Testigo}{Testigo} \right) * 100$$

La fórmula utilizada para calcular la eficiencia porcentual en el análisis estadístico permite comparar el rendimiento de los tratamientos del software CETAGUA frente al tratamiento testigo mediante la relación matemática:  $Eficiencia (\%) = ((Tratamiento - Testigo) / Testigo) * 100$ . Este enfoque cuantifica las variaciones relativas en las variables estudiadas, facilitando la identificación de mejoras o retrocesos. Una eficiencia positiva indica que el tratamiento con el

software supera al testigo en términos de rendimiento, mientras que una eficiencia negativa señala una reducción en la efectividad. Este método es especialmente útil para evaluar cambios en parámetros como tiempo de tratamiento, velocidad de sedimentación y calidad del agua, proporcionando una métrica clara y comparable para valorar los impactos de las calibraciones del software en el proceso de tratamiento de efluentes.

## Resultados

El ANOVA reveló que hubo diferencias estadísticamente significativas en las variables Tiempo, Polímero, TSS, Turbidez y Velocidad de sedimentación, con valores de Sig. <0.05. Esto indica que los tratamientos aplicados con el software CETAGUA produjeron efectos significativamente diferentes en estas variables en comparación con el tratamiento testigo (Tabla 3). En contraste, las otras variables no mostraron diferencias significativas.

**Tabla 3**  
ANOVA de las variables en estudio

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tiempo	Entre grupos	11744465.896	3	3914821.965	1377.493	<0.001
	Dentro grupos	125047.583	44	2841.991		
	Total	11869513.479	47			
Al <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Entre grupos	0.028	3	0.009	0.023	0.995
	Dentro grupos	18.078	44	0.411		
	Total	18.107	47			
Polímero	Entre grupos	1.185	3	0.395	3.176	0.033
	Dentro grupos	5.472	44	0.124		
	Total	6.657	47			
Cal	Entre grupos	0.689	3	0.230	0.030	0.993
	Dentro grupos	332.290	44	7.552		
	Total	332.979	47			

PAC	Entre grupos	2.488	3	0.829	0.077	0.972
	Dentro grupos	de 476.408	44	10.827		
	Total	478.897	47			
HINA X	Entre grupos	1.682	3	0.561	0.107	0.955
	Dentro grupos	de 230.191	44	5.232		
	Total	231.873	47			
pH	Entre grupos	0.111	3	0.037	1.191	0.324
	Dentro grupos	de 1.363	44	0.031		
	Total	1.473	47			
TSS	Entre grupos	1184.917	3	394.972	2.986	0.041
	Dentro grupos	de 5820.333	44	132.280		
	Total	7005.250	47			
Turbidez	Entre grupos	3871.729	3	1290.576	23.609	<0.001
	Dentro grupos	de 2405.250	44	54.665		
	Total	6276.979	47			
Ba	Entre grupos	3.729	3	1.243	0.246	0.864
	Dentro grupos	de 222.583	44	5.059		
	Total	226.313	47			
Ca	Entre grupos	643.229	3	214.410	0.317	0.813
	Dentro grupos	de 29806.250	44	677.415		
	Total	30449.479	47			
SO <sub>4</sub>	Entre grupos	335372.917	3	111790.972	0.951	0.424
	Dentro grupos	de 5174625.000	44	117605.114		
	Total	5509997.917	47			
Velocidad de sedimentación	Entre grupos	1.328	3	0.443	1459.821	<0.001
	Dentro grupos	de 0.013	44	0.000		
	Total	1.341	47			

Nota: Autores (2024).

La Tabla 3 presenta un análisis de varianza (ANOVA) para las variables evaluadas en el estudio, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre los grupos en cada variable analizada. El análisis se realiza con base en los valores de la suma de cuadrados, los grados de libertad (gl), la media cuadrática, el estadístico F y el valor de significancia (Sig.), considerando un nivel de confianza del 95% ( $\alpha = 0.05$ ). A continuación, se expone un análisis detallado de los resultados.

La variable tiempo muestra diferencias altamente significativas entre los grupos (Sig. < 0.001), con un estadístico F elevado (1377.493), lo que sugiere una variación marcada atribuible a los tratamientos evaluados, confirmando la efectividad diferenciada de las calibraciones en este parámetro operativo crítico. De manera similar, la velocidad de sedimentación presenta un F extremadamente alto (1459.821) y una significancia inferior a 0.001, evidenciando diferencias sustanciales entre los grupos que reflejan un impacto significativo de las calibraciones del software en este proceso fundamental del tratamiento de agua.

En contraste, variables como  $Al_2SO_4$  (Sig. = 0.995), cal (Sig. = 0.993), PAC (Sig. = 0.972) y HINAX P (Sig. = 0.955) no presentan diferencias significativas entre los grupos, lo que indica que los cambios en las calibraciones no producen un impacto relevante en estas variables. Este hallazgo sugiere que las dosis o mecanismos relacionados con estos compuestos permanecen constantes independientemente del software utilizado. De igual manera, los elementos químicos Ba (Sig. = 0.864), Ca (Sig. = 0.813) y  $SO_4$  (Sig. = 0.424) también muestran una falta de significancia estadística, indicando que estos parámetros no son sensibles a las modificaciones realizadas en las calibraciones.

Por otro lado, la variable polímero presenta una significancia estadística marginal (Sig. = 0.033), indicando diferencias moderadas entre los grupos que pueden estar relacionadas con la interacción entre la calibración del software y la dosificación de este compuesto. De igual

forma, los sólidos suspendidos totales (TSS) también presentan una significancia estadística (Sig. = 0.041), lo que evidencia ciertas diferencias entre los grupos, aunque no tan marcadas como en otras variables operativas. Por último, la turbidez destaca como una variable con alta significancia (Sig. < 0.001) y un estadístico F considerable (23.609), lo que implica que las calibraciones impactan notablemente en la reducción de este parámetro, posicionándola como una de las áreas de mayor efecto del software.

En resumen, los resultados del ANOVA evidencian que las variables operativas como tiempo, velocidad de sedimentación y turbidez son altamente sensibles a las calibraciones del Software CETAGUA, lo que demuestra su relevancia en la optimización del proceso de tratamiento de agua. Sin embargo, otras variables químicas y físico-químicas como  $Al_2SO_4$ , cal, PAC y  $SO_4$  no muestran diferencias significativas, lo que podría atribuirse a la estabilidad de estos parámetros independientemente de las condiciones evaluadas. Este análisis resalta la necesidad de focalizar futuras mejoras del software en variables sensibles como los TSS y el polímero, además de reforzar las estrategias para optimizar aquellas con un impacto limitado.

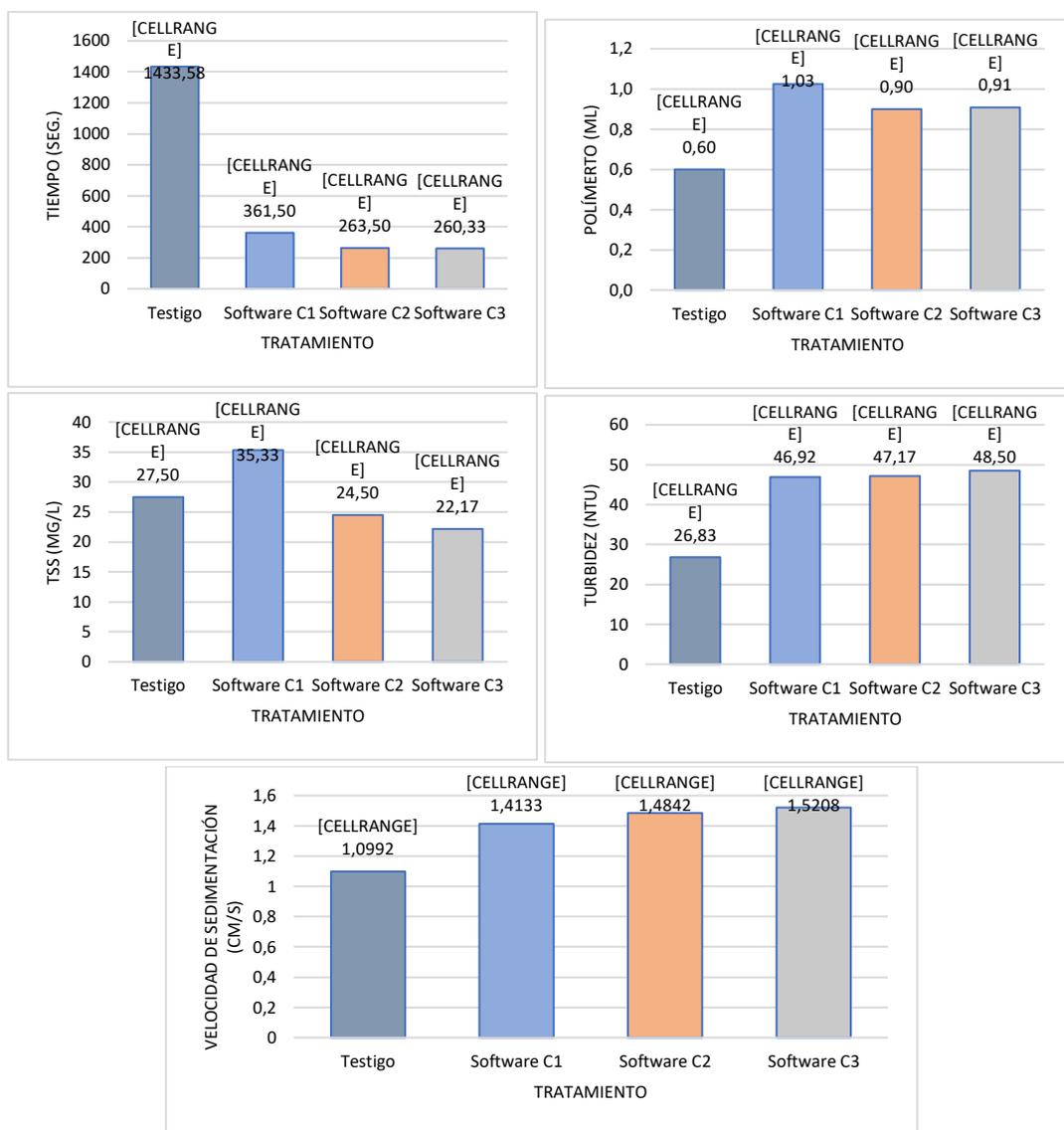
Se observó que el tratamiento Testigo tuvo un tiempo significativamente mayor (1433.58 segundos) en comparación con todos los tratamientos con software, que mostraron tiempos significativamente menores. En el uso de polímero, el tratamiento con Software C1 (1.03 ml) mostró una mayor significancia estadística en comparación con el Testigo (0.60 ml). Los tratamientos con Software C2 y C3, aunque tuvieron valores cercanos entre sí (0.90 y 0.91 ml, respectivamente), no presentaron diferencias significativas con respecto al Testigo o entre ellos (Figura 1).

Los resultados mostraron que el Software C1 (35.33 ml) generó un incremento significativo en los sólidos totales en suspensión (TSS) en comparación con el Testigo. El Software C3 (22.17), sin embargo, resulta en una reducción significativa de TSS. En términos de turbidez, el Software C1, C2 y C3 (46.92, 47.17 y 48.50 NTU, respectivamente) presentan

un aumento significativo en comparación con el Testigo, lo que indica que estos tratamientos, aunque reducen otros tiempos o parámetros, podrían aumentar la turbidez del agua tratada (Figura 1).

Se evidencia un incremento progresivo en la velocidad de sedimentación desde el Testigo (1.09 cm/s) hasta el Software C3 (1.52 cm/s). La prueba de Tukey muestra que cada calibración del software (C1, C2 y C3) mejora significativamente la velocidad de sedimentación en comparación con el Testigo, siendo el Software C3 el más eficiente (Figura 1).

**Figura 1**  
Pruebas de Tukey aplicadas a variables con significancia estadística

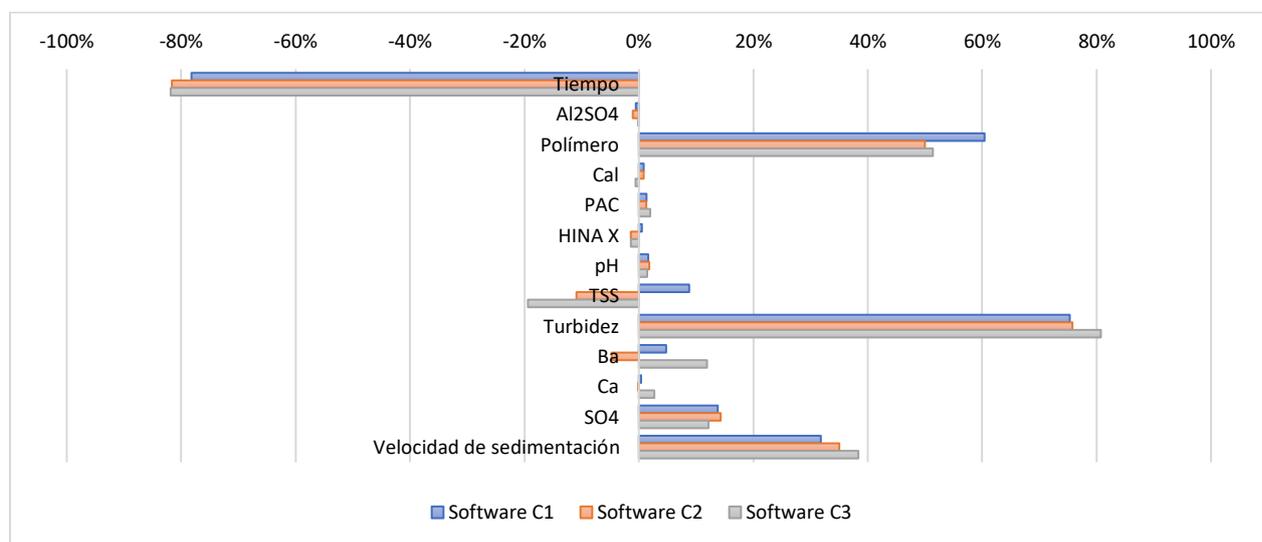


Nota: Autores (2024).

Se observó que las tres calibraciones del software lograron reducir significativamente el tiempo de tratamiento, con reducciones que oscilan entre el 78.20% y el 81.84%. Esto destaca la capacidad del software para acelerar el proceso de tratamiento de manera considerable. Sin embargo, la turbidez del agua tratada mostró un incremento significativo, con un aumento del 75.31% al 80.75% en todas las calibraciones, lo cual es una observación preocupante, ya que sugiere una mayor presencia de partículas en suspensión tras el tratamiento. Este aumento en la turbidez, a pesar de la alta eficiencia en la velocidad de sedimentación (incrementada entre 31.80% y 38.36%), podría indicar problemas en la formación o estabilidad de los flóculos durante la coagulación y floculación (Figura 2).

En cuanto al uso de polímero, las calibraciones C1, C2, y C3 aumentaron su eficiencia en un 50% a 60.42%, lo que implica un mayor consumo en comparación con el tratamiento testigo. Las otras variables químicas, como  $Al_2SO_4$ , PAC, HINA X, y las concentraciones de Ca, Ba y  $SO_4$ , mostraron variaciones mínimas en eficiencia, lo que sugiere que los beneficios del software se concentraron principalmente en la reducción del tiempo y en la mejora de la velocidad de sedimentación, pero con un costo en la calidad del agua tratada, particularmente en términos de turbidez (Figura 2).

**Figura 2**  
Eficiencia de las distintas calibraciones del Software CETAGUA por variables



Nota: Autores (2024).

La Figura 2 representa la comparación de la eficiencia de tres calibraciones diferentes del Software CETAGUA (Software C1, C2 y C3) al evaluar variables clave relacionadas con el tratamiento de agua, tanto operativas como químicas y físico-químicas. Uno de los hallazgos más destacados es la eficiencia negativa significativa observada en el parámetro tiempo (~-80%) en todas las calibraciones, lo que sugiere que ninguna de las versiones del software logra optimizar este aspecto crítico del proceso, probablemente debido a limitaciones en la modelización o a factores externos no considerados en los algoritmos actuales. En relación con los compuestos químicos, el Software C1 muestra un rendimiento sobresaliente en el uso de  $Al_2SO_4$ , alcanzando una eficiencia positiva cercana al 60%, lo que sugiere que esta calibración puede ser adecuada para sistemas que dependen de este coagulante. Por otro lado, los parámetros relacionados con el uso de polímeros, cal y PAC muestran una eficiencia muy limitada, menor al 20%, en todas las calibraciones, lo que refleja un impacto reducido del software en estas áreas. En el caso del coagulante HINAX P, los resultados son prácticamente nulos, lo que indica que este parámetro no está siendo abordado eficazmente por el modelo.

En cuanto a las variables físico-químicas, se observa un desempeño notablemente negativo en la reducción de sólidos suspendidos totales (TSS), con una eficiencia cercana a -60% para las tres calibraciones, lo que sugiere deficiencias en el control de este parámetro, crucial para garantizar la calidad del agua tratada. Sin embargo, el comportamiento es diferente en la turbidez, donde todas las calibraciones logran eficiencias positivas, destacándose el Software C3 con un rendimiento superior (~50%), lo que implica que esta versión podría estar mejor adaptada para optimizar este indicador específico. Para la velocidad de sedimentación, un parámetro esencial en procesos de clarificación, las tres calibraciones muestran una eficiencia moderada (~30%), lo que indica un desempeño aceptable, aunque no óptimo. En cuanto a los elementos químicos específicos (Ba, Ca y  $SO_4$ ), los resultados varían; el Software

C1 muestra una mayor eficiencia en el control de Ca (~30%), mientras que para Ba y SO<sub>4</sub>, las eficiencias son bajas en todas las calibraciones, con valores inferiores al 20%.

En conjunto, los resultados reflejan tanto fortalezas como debilidades de las diferentes calibraciones del Software CETAGUA. El Software C1 se destaca en el uso de Al<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Ca, mientras que el Software C3 es más eficiente en la reducción de turbidez, lo que lo hace más adecuado para ciertos aspectos del tratamiento de agua. Sin embargo, existen áreas críticas de mejora, particularmente en la optimización de TSS y tiempo, que son fundamentales para la eficacia general del tratamiento. Estos hallazgos subrayan la necesidad de realizar ajustes en los algoritmos predictivos del software, así como de evaluar si las limitaciones observadas se deben a restricciones inherentes del modelo o a condiciones experimentales específicas no contempladas. De esta manera, se sugiere un enfoque integral para la recalibración del software que permita mejorar su desempeño en parámetros clave, garantizando un tratamiento de agua más eficiente y sostenible.

## **Discusión**

La significativa reducción en el tiempo de tratamiento observada en las distintas calibraciones del software CETAGUA, con disminuciones que oscilan entre el 78.20% y el 81.84%, evidencia una ventaja clara en la aceleración del proceso de tratamiento de fluidos de perforación. Estos resultados coinciden con estudios previos que han demostrado cómo la automatización y el uso de algoritmos avanzados pueden acortar notablemente el tiempo necesario para alcanzar parámetros de calidad deseados en procesos industriales (Elahi et al., 2023; Javaid et al., 2022).

Sin embargo, el incremento en la turbidez, que varía entre el 75.31% y el 80.75% en las distintas calibraciones, plantea una preocupación considerable sobre la efectividad del tratamiento en términos de calidad del agua. Este aumento podría deberse a una inestabilidad

en los flóculos formados durante la coagulación y floculación, lo que permitiría que las partículas permanecieran en suspensión. Investigaciones similares han señalado que una velocidad de sedimentación excesivamente alta puede impedir una floculación adecuada, resultando en una turbidez residual elevada (Ho et al., 2022; Kang et al., 2024).

Además, el uso de polímeros en las calibraciones C1, C2 y C3 incrementó la eficiencia del proceso entre un 50% y un 60.42%, lo cual, aunque positivo en términos de rendimiento, indica un mayor consumo de químicos en comparación con el tratamiento convencional. Este hallazgo sugiere que, aunque el software CETAGUA optimiza la velocidad de sedimentación y reduce el tiempo total de tratamiento, lo hace a expensas de un mayor uso de insumos químicos, lo que podría no ser sostenible a largo plazo desde una perspectiva económica y ambiental (Sun et al., 2019).

Por último, las variaciones mínimas en la eficiencia de otros compuestos químicos como  $Al_2SO_4$ , PAC, HINA X, y las concentraciones de Ca, Ba y  $SO_4$  sugieren que los beneficios del software se concentran principalmente en la reducción del tiempo y la mejora en la velocidad de sedimentación. Sin embargo, la calidad del agua tratada, especialmente en términos de turbidez, parece estar comprometida, subrayando la necesidad de ajustes adicionales en las calibraciones para equilibrar la eficiencia operativa con la calidad del agua, evitando que la aceleración del proceso comprometa la eliminación adecuada de partículas en suspensión (ElSherbiny y Panglisch, 2021).

## **Conclusión**

La implementación del software CETAGUA permite una notable optimización en el proceso de tratamiento de fluidos de perforación, evidenciada por la significativa reducción en los tiempos de tratamiento. Las calibraciones del software han mostrado una eficiencia

operativa elevada, reduciendo el tiempo de tratamiento hasta en un 81.84%, lo cual es ventajoso para mejorar la eficiencia de las operaciones en la industria petrolera.

Se ha identificado un incremento en la turbidez del agua tratada en todas las calibraciones, lo que sugiere que, si bien el software CETAGUA acelera los procesos de coagulación y floculación, también puede comprometer la calidad del agua tratada al aumentar la cantidad de partículas en suspensión. Este hallazgo indica la necesidad de realizar ajustes adicionales en el software para equilibrar la eficiencia en la reducción del tiempo de tratamiento con la calidad del efluente.

La implementación del software CETAGUA ha evidenciado un incremento en el consumo de polímeros, lo que, si bien mejora la eficiencia en procesos como la coagulación y floculación, podría traducirse en mayores costos operativos y plantear retos significativos en cuanto a la sostenibilidad económica y ambiental a largo plazo. Este hallazgo enfatiza la necesidad de evaluar cuidadosamente el balance entre el consumo de insumos químicos y los beneficios operativos, particularmente cuando se busca mantener un enfoque sostenible en las prácticas industriales. Por otra parte, el análisis de las variables químicas, como  $Al_2SO_4$ , PAC, HINA X, y las concentraciones de Ca, Ba y  $SO_4$ , refleja un impacto limitado en la eficiencia, lo que indica que el software CETAGUA influye de manera más notable en la reducción del tiempo de tratamiento y en la mejora de la velocidad de sedimentación. Sin embargo, estos avances operativos presentan efectos mixtos en la calidad final del agua tratada, especialmente en lo referente a parámetros clave como la turbidez.

En general, los resultados destacan la necesidad de continuar con el desarrollo y ajuste del software CETAGUA, priorizando un enfoque integral que permita equilibrar la eficiencia operativa con la calidad del efluente. Esto implica perfeccionar las calibraciones del software para garantizar que la aceleración de los procesos no comprometa el cumplimiento de los estándares ambientales, particularmente en términos de calidad del agua. Asimismo, el ajuste

de algoritmos predictivos y la evaluación de condiciones experimentales podrían ser estrategias clave para mejorar el rendimiento del software y asegurar un balance sostenible entre la optimización del tiempo de procesamiento y la conservación de los recursos ambientales.

## Referencias bibliográficas

- Amores, J., Gutiérrez, E., Vinueza, G., & Torres, G. (2020). Cálculo Preliminar de la Tasa de Retorno Energético (EROI) del Petróleo Ecuatoriano. *Aporte Santiaguino*, 13(1), 59-76. <https://doi.org/10.32911/as.2020.v13.n1.681>
- Arauz, L. (2022). Lineamientos de política hidrocarburífera periodo 2021-2025. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 14(2), 124-129. <https://doi.org/10.29166/revfig.v14i2.3590>
- Elahi, M., Afolaranmi, S., Martinez, J., & Perez, J. (2023). A comprehensive literature review of the applications of AI techniques through the lifecycle of industrial equipment. *Discover Artificial Intelligence*, 3(1), 43. <https://doi.org/10.1007/s44163-023-00089-x>
- ElSherbiny, I., & Panglisch, S. (2021). Enhancing the Efficiency of Membrane Processes for Water Treatment. *Membranes*, 11(3), 215. <https://doi.org/10.3390/membranes11030215>
- Herrera, J. (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. III: Sistemas básicos y procesos de los equipos de perforación*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.62720>
- Herrera, R. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33-56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Ho, Q., Fettweis, M., Spencer, K., & Lee, B. (2022). Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*, 213, 118147. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118147>
- Jaramillo, M. (2019). Identificación de Posibles Impactos Medioambientales y Sociales del Turismo en Ecuador, Caso Concreto Parque Nacional Yasuní. *Observatorio Medioambiental*, 22, 231-244. <https://doi.org/10.5209/obmd.67070>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008>
- Kang, X., Shen, J., Gui, Y., & Ma, X. (2024). Unveiling the dynamic behavior of water molecules and subsequent kaolinite microstructure change during wetting: A large-scale molecular dynamics investigation. *Computers and Geotechnics*, 175, 106705. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106705>
- Pozo, B. (2015). *Estudio para mejorar el proceso de tratamiento de aguas y manejo de sólidos de los fluidos de perforación en pozos del oriente ecuatoriano* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10268/3/CD-6132.pdf>
- Soroa, M., Díaz, Y., Rivas, L., & Martínez, J. (2021). Disposición final de cortes de perforación petrolera en la fabricación del Clinker de cemento. *Centro Azúcar*, 48(4), 63-73. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n4/2223-4861-caz-48-04-63.pdf>

- Sun, Y., Zhou, S., Chiang, P.-C., & Shah, K. (2019). Evaluation and optimization of enhanced coagulation process: Water and energy nexus. *Water-Energy Nexus*, 2(1), 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.01.001>
- Yáñez, I., Aguirre, M., Jarrin, P., Cuvi, N., Zalles, J., Terán, F., Almeida, A., Bermúdez, P., Uribe, S., Vallejo, I., Vallejo, A., Bayón, M., Moreano, M., Acosta, A., & Fajardo, P. (2023). *Amazonía sin petróleo: Historias para cambiar la historia* (Abya-Yala). <https://books.google.com.ar/books?id=wib2EAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es>