

Efecto de coagulación-floculación en remoción del hierro y manganeso en acuífero

Coagulation effect-flocculation in removal of iron and manganese in aquifer

 Olano-Arévalo, Roydichan^{1*}

 Tuesta-Casique, Angel¹

 Azabache-Aliaga, Belén²

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

²Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

Recibido: 24 Jun. 2022 | **Aceptado:** 29 Dic. 2022 | **Publicado:** 20 Ene. 2023

Autor de correspondencia*: rolano@unsm.edu.pe

Como citar este artículo: Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A. & Azabache-Aliaga, B. (2023). Efecto de coagulación-floculación en remoción del hierro y manganeso en acuífero. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(1), e464.

<https://doi.org/10.51252/reacae.v2i1.e464>

RESUMEN

En el distrito de Yantaló, Moyobamba, existe un acuífero que abastece de agua como servicio ambiental a la comunidad, éste presenta evidencias de alta concentración de hierro y manganeso indicando contaminación por metales pesados. El objetivo fue determinar el efecto del proceso de coagulación - floculación en la remoción del hierro (Fe) y manganeso (Mn) en el acuífero. Se hipotetizó que el proceso de coagulación - floculación favorece la remoción del hierro y manganeso, siendo la investigación aplicada, cuyo diseño fue pre experimental. El acuífero se dividió en cinco zonas, tomándose 20 muestras y se utilizó el método de Prueba de Jarras. Los resultados iniciales arrojaron que la concentración de hierro superaba los Límites Máximos Permisibles (LMP) de agua para consumo humano; después de aplicar la variable independiente las concentraciones de hierro disminuyeron hasta 0,3 mg Fe/L. Concluyendo que luego del proceso de coagulación - floculación a través de la dosis óptima de sulfato de aluminio al 1% de solución madre, los parámetros finales se mantienen dentro del rango esperado. Se propone el diseño de dosificación óptima del Coagulante - Floculante para el tratamiento convencional del agua del acuífero.

Palabras clave: agua; coagulantes; floculantes; parámetros

ABSTRACT

In the district of Yantaló, Moyobamba, there is an aquifer that supplies water as an environmental service to the community, it presents evidence of a high concentration of iron and manganese indicating contamination by heavy metals. The objective was to determine the effect of the coagulation-flocculation process on the removal of iron (Fe) and manganese (Mn) in the aquifer. It was hypothesized that the coagulation - flocculation process favors the removal of iron and manganese, being the applied research, whose design was pre-experimental. The aquifer was divided into five zones, taking 20 samples and using the Jar Test method. The initial results showed that the iron concentration exceeded the Maximum Permissible Limits (MLP) of water for human consumption; after applying the independent variable, iron concentrations decreased to 0.3 mg Fe/L. Concluding that after the coagulation - flocculation process through the optimal dose of aluminum sulfate at 1% mother solution, the final parameters remain within the expected range. The optimal dosage design of the Coagulant - Flocculant for the conventional treatment of aquifer water is proposed.

Keywords: water; coagulants; flocculants; parameters

1. INTRODUCCIÓN

El hierro y el manganeso son elementos que dificultan el abastecimiento del agua potable. Álvarez Bastida (2018) encontró en un acuífero en Toluca presencia de hierro y manganeso en uno de los pozos estudiados que rebasa el límite permisible, lo cual puede causar daños a la salud de los consumidores. Siendo el más común el hierro que el manganeso, pero con poca frecuencia ocurren juntos, ello ha ocasionado que ciudades que no cuenten con sistema de tratamiento adecuado del agua presenten bacterias, hierro y manganeso, causando problemas en la salud de los consumidores, así como, en las tuberías y otros. La presencia de hierro puede provocar coloración, olor y generación de turbidez en las aguas debido a la oxidación de este compuesto, y la presencia de manganeso en niveles elevados se consideran indeseables ya que la interacción de este componente con el aire provoca la oxidación a Mn (IV) el cual otorga un sabor amargo o metálico y en interacciones con ciertos materiales provoca manchas (Guillen-Rivas et al., 2021).

La calidad del agua es un tema sensible y preocupante, puesto que una de las causales de su alteración es la contaminación, la UNESCO (2021) en su Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021; afirma que se han logrado reportar algunas tendencias sobre la calidad del agua, a pesar de que los datos mundiales sobre la misma siguen siendo escasos, dada la falta de capacidad para supervisar y elaborar informes, especialmente en algunos de los países menos desarrollados. La calidad del agua se ha deteriorado como resultado de la contaminación en casi todos los principales ríos de África, Asia y América Latina (Sierra Ramírez, 2021).

En contraste al problema, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, en el Objetivo de Desarrollo Sostenible sobre agua limpia y saneamiento PNUD (2015), menciona que la escasez de agua afecta a más del 40 por ciento de la población mundial, una cifra alarmante que probablemente aumente a medida que se incrementen las temperaturas globales debido al cambio climático. Aunque 2,100 millones de personas han obtenido acceso a mejores servicios de agua y saneamiento desde 1990, la disminución del acceso al agua potable de alta calidad es un problema importante y delicado que afecta a todos los continentes.

Se conoce que, en las redes de suministro de agua, el hierro y el manganeso del agua del grifo se oxidan a una valencia alta durante la desinfección. La precipitación de óxido formada en la tubería se adsorbe fácilmente en la red de suministro de agua, lo que afecta la calidad del suministro de agua potable (Kang et al., 2022). Es por ello, que en el proceso de potabilización del agua para consumo humano, la clarificación es una etapa importante, ya que permite la eliminación de los materiales sólidos y coloidales suspendidos, que involucra las fases de coagulación - floculación, donde para la coagulación se emplean compuestos químicos y polímeros sintéticos para aglutinar los sólidos en suspensión; la floculación, es la acumulación, por gravedad y filtrado de los flóculos, y la sedimentación, en la cual se retiran las partículas portadoras de bacterias que generan el color y la turbiedad del agua. En consecuencia, el compuesto químico más utilizado es el sulfato de aluminio (Valeriano-Mamani & Matos-Chamorro, 2019).

En el ámbito internacional respecto a la contaminación de aguas subterráneas por metales pesados, Hernández González et al. (2017) encontraron que las concentraciones de metales, específicamente hierro y manganeso, pueden indicar un grado de contaminación en estos acuíferos. Lo anterior, implica evitar su consumo por parte de la comunidad, ya que los datos encontrados reflejan que los niveles en algunos de los pozos muestreados rebasan los límites máximos permisibles. El consumo de agua con altos contenidos de manganeso representa graves daños a la salud, especialmente a la niñez. Aunque el hierro y el manganeso son oligoelementos necesarios para el cuerpo humano, beber agua superficial o subterránea con alto contenido de hierro y manganeso durante mucho tiempo provocará una intoxicación crónica y daños a la salud humana (Guillen-Rivas et al., 2021). Por lo general, el manganeso en cantidades excesivas puede actuar como un neurotóxico potencial; una mayor acumulación dentro del cuerpo puede afectar potencialmente la patogénesis neurodegenerativa (Chang-Long et al., 2022).

En la Amazonía peruana las aguas que provienen de cuerpos de agua superficial se convierten en un elemento fundamental para la promoción del desarrollo sostenible de las comunidades cuyo uso va desde el consumo humano, agrícola, pecuario, minero y energético. Asimismo, las fuentes de aguas subterráneas son las reservas de agua dulce para consumo humano, por lo tanto, resulta necesario definir su ubicación, cantidad, calidad, y distribución dentro de la unidad básica de planificación y desarrollo llamado cuenca hidrológica (Ruiz Martínez & Coronado Coronel, 2016).

En el distrito de Yantaló existe un acuífero que abastece de agua como servicio ambiental a toda la comunidad, la misma que presenta evidencias de alta concentración de hierro y manganeso, cuya presencia indica un alto nivel de contaminación por metales pesados; por lo tanto, estas aguas para ser usadas en el consumo humano y otros fines, deben ser previamente descontaminadas mediante procesos adecuados para garantizar el suministro de un servicio ambiental de calidad (Sandoval Salazar et al., 2020).

El hierro y el manganeso en las aguas subterráneas se pueden eliminar de manera efectiva mediante el uso de técnicas de tratamiento de agua que podrían adaptarse a la forma y concentración de hierro y manganeso contenida en el agua (Zevi et al., 2018). En consecuencia, existen diversos procesos disponibles para eliminar estos contaminantes y tienen una base fisicoquímica o biológica. Du et al. (2017) desarrollaron la propuesta PAC-MBR como una tecnología prometedora para la eliminación de hierro, manganeso y amoníaco en las aguas subterráneas, concluyendo que el sistema PAC-MBR produjo un buen efluente (hierro < 0,2 mg/L - 1; manganeso < 0,1 mg/L - 1 y amoníaco < 0,05 mg/L - 1) al purificar una gama más amplia de afluentes. En la misma línea de propuestas de eliminación de metales pesados en el agua, Swistock & William Sharpe (2019) precisa que los filtros oxidantes oxidan y filtran hierro y manganeso en una sola unidad. El filtro suele estar compuesto por arena verde tratada con manganeso, aunque también se pueden utilizar otros materiales como el BIRM. En el caso de un filtro de arena verde de manganeso, el medio filtrante se trata con permanganato de potasio para formar una capa que oxida el hierro y el manganeso disueltos y luego los filtra fuera del agua. Debido a que estas unidades combinan oxidación y filtración, pueden usarse para tratar agua cruda con hierro y manganeso disueltos y/u oxidados.

En el presente estudio optamos por aplicar del proceso de coagulación - floculación, en la remoción del hierro y manganeso presente en aguas del acuífero. El problema se define por la presencia de impurezas del tipo inorgánica y orgánica provenientes de los acuíferos, tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Para su remoción, tuvimos que alterar algunas características del agua, y logramos esta transformación a través de los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Planteamos como objetivo general, determinar el efecto del proceso de coagulación - floculación en la remoción del hierro y manganeso presente en acuífero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación tiene una cobertura para las aguas del acuífero. La investigación es del tipo aplicada. El diseño de investigación es el establecido por Hernández Sampieri et al. (2014), denominado "Diseño de preprueba - posprueba con un solo grupo" que se ubica en diseños preexperimentales.

Utilizamos los siguientes materiales y equipos: Equipo de Prueba de Jarras, coagulante, floculante.; y reactivos: Sulfato de Aluminio tipo A, sulfato de aluminio tipo B y polímero catiónico.

Para disminuir el error experimental, dividimos el acuífero en cinco zonas y en cada zona tomamos cuatro muestras, lo cual hace un total de veinte muestras debido a la alta variabilidad geográfica del terreno. Realizamos ocho ensayos en dos meses consecutivos, hicimos evaluaciones cualitativas y cuantitativas de las muestras captadas en cada zona. Para las interpretaciones de los resultados, en las variables

cuantitativas, utilizamos las medidas de dispersión estadística, los coeficientes de regresión y correlación lineal y múltiple.

Finalmente, hicimos una evaluación comparando con Estándares de la Legislación Peruana para aguas de consumo doméstico. Una vez aplicado los instrumentos de recolección de la información, realizamos el tratamiento correspondiente para el análisis de los mismos, utilizando la estadística descriptiva.

3. RESULTADOS

3.1. Características físico químicas iniciales (Turbidez, pH, conductividad, STD, color, hierro y manganeso) del agua del acuífero

En la Tabla 1, se observa que los valores de turbidez obtenidos no varían considerablemente, el mayor valor obtenido es 90 UNT y el menor 58 UNT. Dichos valores superan los Límites Máximos Permisibles (LMP) de parámetros de calidad de agua para consumo humano (5 UNT), de acuerdo a lo establecido en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010).

Los valores de pH, conductividad, TDS, color, Fe²⁺ y Mn, no presentan diferencias significativas; los valores mayores y menores de los parámetros obtenidos son los siguientes: pH es 6,9 y 6,68; de conductividad es 47,5 y 35,00, de TDS 24,3 y 12,2; de color es 70,2 y 55; el de hierro 0,56 y 0,38 mg/L y el valor mayor obtenido de manganeso de 0,32 y el menor es de 0,25 mg Mn/L. Dichos valores no superan los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano, los valores establecidos son: el rango de pH esta entre 6,5 a 8,5; el de conductividad 1 500 µmho/cm, el de TDS 1 000 mg/L, el de color 15 UCV escala Pt/Co, el de hierro 0,3 mg/L y el de manganeso 0,4 mg Mn/L. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 1.

Parámetros físico – químicos iniciales del agua cruda del acuífero

| Parámetro | Unid. | Resultados obtenidos del análisis de laboratorio en los ensayos | | | | | | | |
|---------------|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Turbiedad | NTU | 87,00 | 68,00 | 70,00 | 62,00 | 58,00 | 74,00 | 90,00 | 80,00 |
| pH | Unid. | 6,90 | 6,70 | 6,68 | 6,85 | 6,85 | 6,82 | 6,88 | 6,78 |
| Conductividad | µS/cm | 37,80 | 42,20 | 40,00 | 35,00 | 45,50 | 42,00 | 47,50 | 38,20 |
| TDS | mg/L | 12,20 | 20,10 | 20,00 | 17,50 | 23,00 | 21,00 | 24,30 | 19,20 |
| Color | UCV-Pt/Co | 65,00 | 60,00 | 58,00 | 59,00 | 55,00 | 62,00 | 70,20 | 60,00 |
| Temperatura | °C | 22,50 | 22,50 | 22,60 | 22,80 | 22,60 | 22,60 | 22,60 | 22,50 |
| Hierro | mg/L | 0,45 | 0,48 | 0,40 | 0,38 | 0,38 | 0,48 | 0,56 | 0,40 |
| Manganeso | mg/L | 0,32 | 0,30 | 0,25 | 0,29 | 0,25 | 0,29 | 0,28 | 0,25 |

Según la Tabla 2, los valores de Aluminio obtenidos durante el período de evaluación no varían considerablemente, obteniendo el mayor valor 0,19 mg/L y el menor 0,15 mg/L. Dichos valores no superan los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano (0,2 mg/L), asimismo, se puede determinar el olor aceptable de las evaluaciones del agua cruda. Otros parámetros evaluados, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.

Parámetros adicionales evaluados en el agua cruda del acuífero

| Parámetro | Unid. | Resultados obtenidos del análisis de laboratorio en los ensayos | | | | | | | |
|-----------|-----------|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Olor | Aceptable | Ferroso | Ferroso | Ferroso | Ferroso | Ferroso | Ferroso | Ferroso | Ferroso |
| Aluminio | mg/L | 0,17 | 0,18 | 0,15 | 0,16 | 0,15 | 0,15 | 0,19 | 0,15 |

3.2. Relación del hierro y manganeso con los rangos establecidos para aguas con fines de consumo humano (LMP)

Tabla 3.

Relación de niveles de hierro y LMP para agua de consumo humano

| Parámetro | Unid. | Resultados obtenidos del análisis de Laboratorio según ensayos | | | | | | | |
|-------------|-------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Hierro | mg/L | 0,45 | 0,48 | 0,40 | 0,38 | 0,38 | 0,48 | 0,56 | 0,40 |
| LMP | mg/L | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Diferencia | mg/L | 0,15 | 0,18 | 0,10 | 0,08 | 0,08 | 0,18 | 0,26 | 0,10 |
| Observación | | Superan los LMP | | | | | | | |

Nota: El Límite Máximo Permissible para el parámetro hierro (+2), en agua para consumo humano de acuerdo con lo establecidos en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010) es de 0,3 mg Fe/L.

Según la Figura 1, la concentración de Fe⁺² supera los LMP de parámetros de calidad de agua; por lo que es necesario realizar el tratamiento para la reducción.

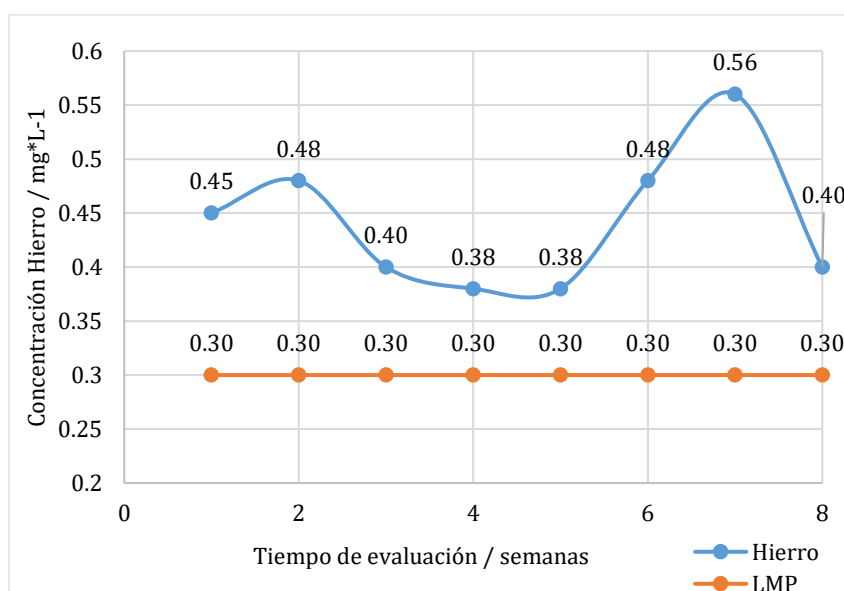


Figura 1. Resultados de concentración de hierro del agua

Tabla 4.

Relación de niveles de Manganeso y LMP para agua de consumo humano

| Parámetro | Unid. | Resultados obtenidos del análisis de laboratorio según ensayos | | | | | | | |
|-------------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Manganeso | mg/L | 0,32 | 0,30 | 0,25 | 0,29 | 0,25 | 0,29 | 0,28 | 0,25 |
| LMP | mg/L | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| Diferencia | mg/L | -0,08 | -0,10 | -0,15 | -0,11 | -0,15 | -0,11 | -0,12 | -0,15 |
| Observación | | No superan los LMP | | | | | | | |

En la Figura 2, se observa que la concentración de Mn no supera los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano, por lo que se encuentra dentro de LMP y no es necesario la reducción en el nivel de Mn presente en el agua.

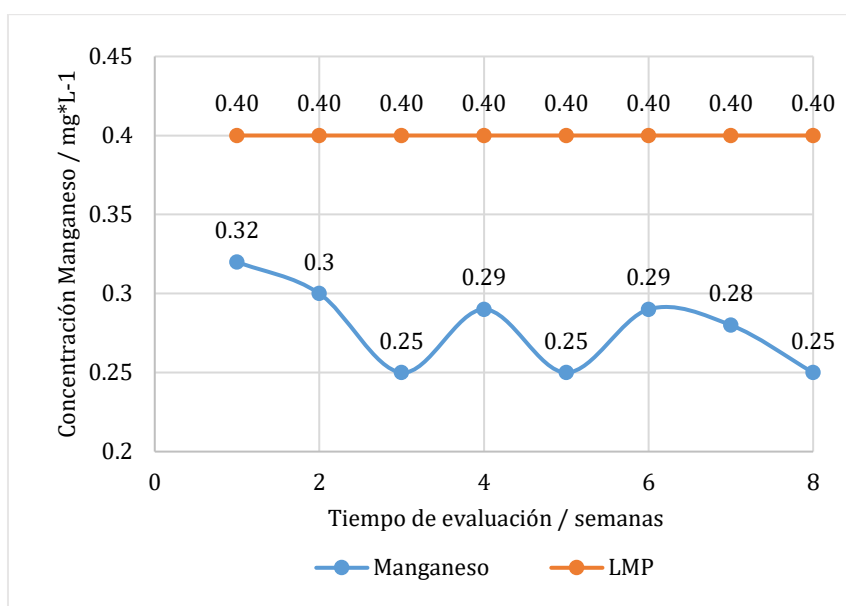


Figura 2. Resultados de concentración de manganeso del agua

3.3. Parámetros finales físico químicos (turbiedad, pH y hierro); después del proceso de coagulación – floculación

Para determinar los niveles de los parámetros físicos químicos finales, utilizamos la Prueba de Jarras. Cabe señalar que el proceso de coagulación – floculación, con sulfato de aluminio tipo A, sulfato de aluminio tipo B (coagulantes) y con polímero catiónico (floculante); tuvimos en cuenta las siguientes consideraciones técnicas:

Tabla 5.

Dosificación de coagulante – floculantes empleados

| Solución / 2000 mL | Jarra 1 | Jarra 2 | Jarra 3 | Jarra 4 | Jarra 5 | Jarra 6 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Concentración (mg/L) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| mL | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

Según la Tabla 6, los resultados en los ensayos 5, 6, 7, 8 realizados el mes octubre son buenos después de haber utilizado el sulfato de aluminio granulado tipo A, donde los parámetros se encuentran dentro del rango que indican los LMP. Los parámetros físico químicos del agua varían en función al tiempo climático ya que en estas épocas de setiembre y octubre registran turbiedades bajas y poca variación en sus concentraciones.

El sulfato de aluminio tipo A, es un coagulante efectivo en el tratamiento de aguas para consumo humano dado que se presentan porcentajes significativos en la turbiedad.

Tabla 6.

Parámetros físico - químicos finales del agua cruda del acuífero

| Parámetro | Unid | Resultados obtenidos del análisis de laboratorio en las Prueba de Jarras según ensayos | | | | | | | | | | | Prom | DE | IC (95%) |
|-----------|------|--|------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|
| | | Prueba de Jarras | | Ensayos (setiembre - octubre) | | | | | | | | | | | |
| | | Nº | mg/L | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | | |
| Turbiedad | NTU | 1 | 10 | 44,00 | 38,00 | 40,00 | 38,00 | 30,00 | 29,00 | 52,00 | 25,00 | 37,00 | 8,7994 | 6,0975 | |
| | | 2 | 15 | 7,93 | 6,93 | 8,20 | 9,93 | 8,63 | 8,43 | 10,32 | 9,20 | 8,70 | 1,0981 | 0,7609 | |
| | | 3 | 20 | 1,20 | 4,20 | 3,20 | 3,20 | 2,20 | 1,40 | 1,80 | 1,10 | 2,29 | 1,1307 | 0,7835 | |
| | | 4 | 25 | 2,50 | 1,10 | 3,00 | 1,50 | 1,30 | 2,00 | 2,45 | 2,00 | 1,98 | 0,6546 | 0,4536 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|---|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|
| | | 5 | 30 | 2,80 | 2,20 | 2,00 | 2,18 | 2,80 | 1,85 | 1,25 | 2,15 | 2,15 | 0,5245 | 0,3635 |
| | | 6 | 35 | 1,80 | 1,60 | 2,15 | 1,95 | 1,60 | 1,72 | 1,58 | 1,40 | 1,73 | 0,2375 | 0,1646 |
| pH | Unid | 1 | 10 | 7,54 | 7,68 | 7,55 | 7,55 | 7,45 | 7,52 | 7,57 | 7,43 | 7,54 | 0,0767 | 0,0532 |
| | | 2 | 15 | 7,57 | 7,65 | 7,50 | 7,60 | 7,52 | 7,55 | 7,56 | 7,48 | 7,55 | 0,0550 | 0,0381 |
| | | 3 | 20 | 7,37 | 7,58 | 7,48 | 7,52 | 7,48 | 7,60 | 7,52 | 7,45 | 7,50 | 0,0731 | 0,0507 |
| | | 4 | 25 | 7,49 | 7,49 | 7,50 | 7,50 | 7,47 | 7,52 | 7,55 | 7,40 | 7,49 | 0,0434 | 0,0301 |
| | | 5 | 30 | 7,58 | 7,68 | 7,56 | 7,51 | 7,56 | 7,54 | 7,58 | 7,52 | 7,57 | 0,0526 | 0,0365 |
| | | 6 | 35 | 7,45 | 7,55 | 7,59 | 7,56 | 7,50 | 7,58 | 7,55 | 7,46 | 7,53 | 0,0535 | 0,0370 |
| Hierro | mg/L | 1 | 10 | 0,30 | 0,18 | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,18 | 0,19 | 0,20 | 0,21 | 0,0421 | 0,0292 |
| | | 2 | 15 | 0,28 | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,19 | 0,17 | 0,18 | 0,20 | 0,0344 | 0,0238 |
| | | 3 | 20 | 0,13 | 0,19 | 0,22 | 0,18 | 0,20 | 0,13 | 0,15 | 0,10 | 0,16 | 0,0419 | 0,0290 |
| | | 4 | 25 | 0,22 | 0,12 | 0,19 | 0,13 | 0,12 | 0,16 | 0,18 | 0,15 | 0,16 | 0,0360 | 0,0250 |
| | | 5 | 30 | 0,29 | 0,20 | 0,12 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,13 | 0,16 | 0,17 | 0,0540 | 0,0374 |
| | | 6 | 35 | 0,23 | 0,19 | 0,15 | 0,17 | 0,13 | 0,15 | 0,14 | 0,12 | 0,16 | 0,0359 | 0,0248 |

En la Figura 3, se observa que luego de realizar la Prueba de Jarras con la dosificación especificada de coagulante y floculante en las Jarras 3, 4, 5 y 6 cuyas concentraciones son 20, 25, 30 y 35 mg/L, los niveles de turbidez no superan los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano (5 NTU) de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010). Asimismo, las barras de error indican un adecuado desarrollo de las mediciones en cada uno de los ensayos.

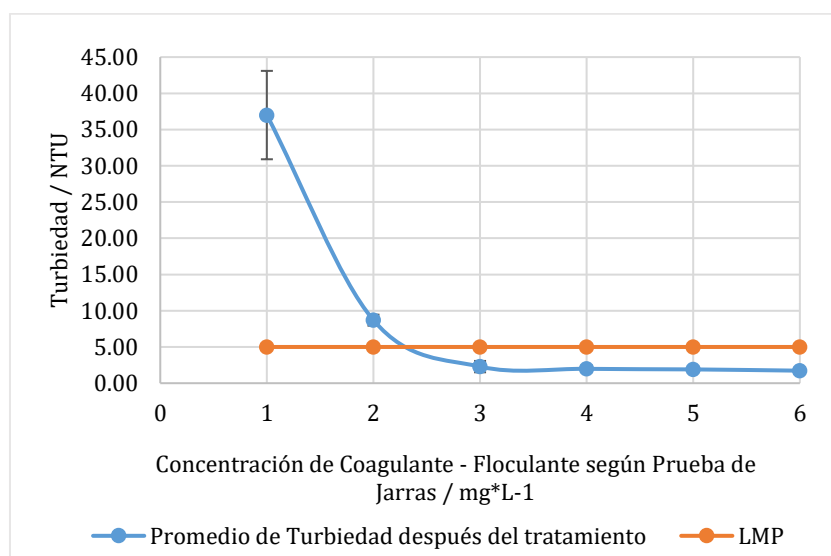


Figura 3. Resultados de turbiedad / NTU del agua

En la Figura 4, se evidencia que los resultados obtenidos al realizar la Prueba de Jarras con la dosificación especificada de coagulante y floculante en todas las Jarras los niveles de pH se encuentran dentro de los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano (6,5 a 8,5) de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010). Asimismo, las barras de error indican un adecuado desarrollo de las mediciones en cada uno de los ensayos.

En la Figura 5, se aprecia que los resultados obtenidos al realizar la Prueba de Jarras con la dosificación especificada de coagulante y floculante; las concentraciones de Hierro se encuentran por debajo de los LMP de parámetros de calidad de agua para consumo humano (0,3 mg Fe/L) de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010). En efecto, siendo el menor valor obtenido de 0,16 mg/L al aplicar las dosificaciones en las jarras 3, 4 y 6 (20, 25 y 35 mg/L) resultan eficientes para el proceso de remoción del hierro (+2) en aguas del acuífero estudiado.

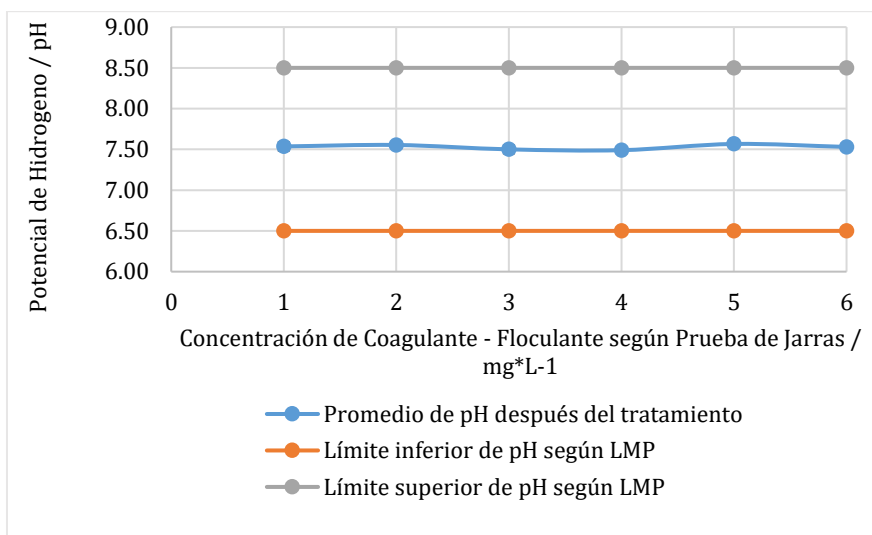


Figura 4. Resultados de potencial hidrógeno (pH) del agua

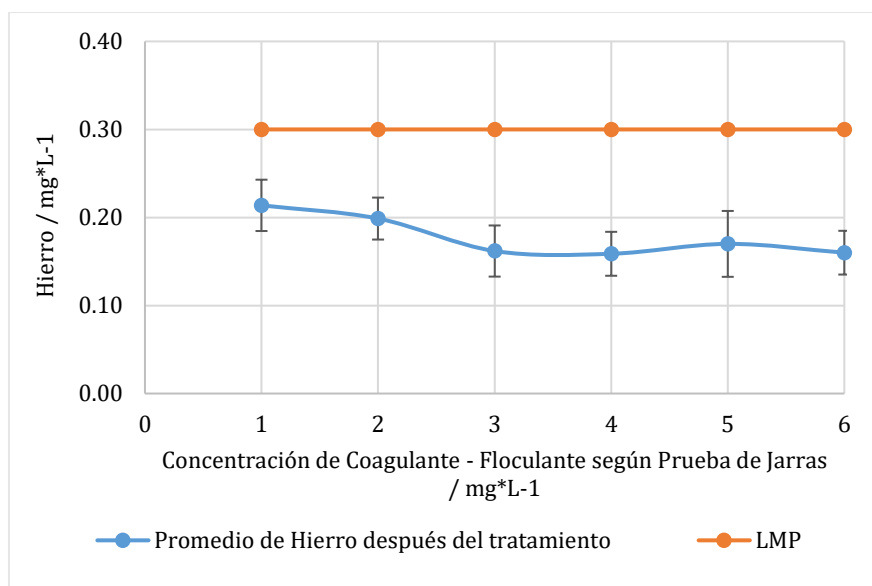


Figura 5. Resultados de hierro en el agua

3.4. Propuesta de diseño de dosificación óptima

La propuesta de diseño de dosificación óptima para el tratamiento convencional del agua del acuífero del distrito de Yantaló mediante el proceso de coagulación – floculación para remoción del hierro y manganeso empleando sulfato de aluminio tipo A, sulfato de aluminio tipo B (coagulantes) y con polímero catiónico (floculante), se plantea a partir del resultado promedio de dosis óptima obtenidos en cada ensayo realizado durante dos meses (setiembre y octubre del 2015). Los parámetros de operación que se sugieren son los propuestos en la Tabla 5. El resumen de dosis óptimas encontradas se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 7.

Resumen de dosis óptima encontrada en los ensayos de Pruebas de Jarras para la remoción del Hierro durante el tiempo de evaluación (setiembre – octubre)

| Coagulante | Unid. | Dosis óptimas según ensayos para la remoción del Hierro | | | | | | | | Prom |
|------------------------------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ | mg/L | 20,00 | 25,00 | 30,00 | 25,00 | 25,00 | 20,00 | 30,00 | 20,00 | 24,38 |

Tabla 8.

Propuesta de diseño de dosificación óptima de Coagulante – Floculante para la remoción de hierro y manganeso presente en las aguas del acuífero

| Solución / 2000 mL | Dosificación del Coagulante - Floculante |
|--|---|
| Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ / $mg \cdot L^{-1}$ | 25 |
| mL | 5 |

4. DISCUSIONES

De los parámetros físico químico iniciales de calidad de agua del acuífero, el parámetro de turbiedad supera considerablemente (el menor nivel es de 58 UNT) los LMP (5 UNT), al igual que los parámetros color y hierro; siendo el valor obtenido de 70,2 UCV escala Pt/Co y 0,56 mg/L respectivamente en comparación con los ECAS establecidas en el Decreto Supremo N.º015-2015-MINAM (2015) (15 UCV escala Pt/Co y 0,30 mg/L respectivamente). Los parámetros conductividad, STD, pH y manganeso no superan los LMP, al igual que menciona Álvarez Bastida (2018), en los últimos años se han observado cambios significativos y continuos en la composición fisicoquímica del agua de uso y consumo, entre ellos, el incremento de los iones nitratos y el dióxido de carbono, los cuáles pueden ser transportados al agua naturalmente o por actividades antropogénicas, y entrar en contacto con el agua aportando acidez lo cual la hace corrosiva o agresiva, deteriorando la infraestructura metálica y/o materiales con que entra en contacto, incorporando al agua hierro y manganeso solubles lo que afectan las propiedades organolépticas, al aportar color y turbiedad al agua.

Los niveles de hierro obtenidos del análisis de laboratorio en el periodo de evaluación superan los niveles establecidos en el Decreto Supremo N.º015-2015-MINAM (2015) y en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010); siendo el mayor valor de diferencia de 0,26 mg/L y el menor de 0,08 mg/L, excediendo en 33% aproximadamente. Respecto a los niveles de manganeso. Dichos valores no superan los Límites Máximos Permisibles de parámetros de calidad de agua para consumo humano (0,4 mg Mn/L), de acuerdo con lo establecidos en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010), así como Hernández González et al. (2017) indica que la presencia de manganeso fue detectada en cinco de los siete pozos analizados en el Municipio de Apan. Sin embargo, solo en los pozos de Santa Cruz (4,05 mg/L) y Chimalpa (3,718 mg/L), los niveles de manganeso sobrepasaron ampliamente el límite recomendado por la Norma Oficial Mexicana que es de 0,15 mg/L. Asimismo, no se encontró correlación entre las concentraciones de hierro y manganeso. De los sitios evaluados, el pozo de Santa Cruz fue el que presentó las concentraciones más altas para ambos metales. El resto de los parámetros complementarios estuvieron dentro del rango establecido por la norma.

Los niveles de los parámetros físico químico finales de calidad de agua del acuífero a través de la dosis óptima de sulfato de aluminio al 1% de solución madre (Prueba de jarras) se pudo establecer los parámetros finales una turbiedad 1,73 NTU, pH 7,49 y de hierro (+2) 0,16 mg/L. Se observa, que en los ensayos 5, 6, 7, 8 realizados el mes octubre son buenos después de haber utilizado el sulfato de aluminio granulado tipo A donde los parámetros se encuentran dentro del rango que nos indican los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP). En efecto, no existe una correlación lineal entre la dosis óptima aplicada del coagulante y la turbiedad del agua cruda, dado que en los ensayos experimentales se obtuvieron resultados con dosificaciones mayores en muestras de turbiedad bajas, mientras que en turbiedades altas se emplean dosificaciones menores; así como menciona SENA (2020), que el ensayo de jarras ha sido ampliamente usado; sus resultados tienen gran aplicabilidad en el diseño y la operación real de las unidades de tratamiento, así como en la optimización de plantas existentes. El procedimiento requiere como datos previos los valores de pH, turbiedad, color y alcalinidad del agua cruda; Cruz Monzon et al. (2011) afirma que uno de los coagulantes que se utilizan en la práctica para agua potable son sales de Aluminio quienes forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas son: El Sulfato de

Aluminio, $Al_2(SO_4)_3 \times 14H_2O$, que en la práctica se le denomina como Alumbre; el Sulfato de Aluminio Amoniaco y el Aluminato Sódico. El primero es el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo. En la misma línea de coincidencias Bora et al. (2018) concluye que el método OCOP modificado muestra que las concentraciones de hierro y manganeso del agua contaminada se pueden eliminar simultáneamente a menos de 0,03 mg/L y 0,009 mg/L a partir de concentraciones iniciales de 1–8 mg/L y 0,5–5,0 mg/L, respectivamente.

La propuesta de diseño de dosificación óptima del coagulante - floculante para el tratamiento convencional del agua del acuífero del distrito de Yantaló con sulfato de aluminio al 1% de solución madre, la concentración óptima es de 25 mg/L, en comparación de lo que determinó Galindo Yantas (2018) que durante los meses de avenidas las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B, siendo el rango de aplicación en la época de avenidas (enero, febrero, marzo y abril), de 29 mg/L a 34 mg/L, siendo el promedio de la dosificación en épocas de avenidas 31,5 mg/L, mientras en la época de estiaje el rango de aplicación se encuentra dentro del rango de 24 mg/L a 29 mg/, siendo el promedio de la dosificación en épocas de estiaje 26,5 mg/L al aplicar las dosis en los rangos ya mencionados se puede garantizar que el agua tratada cumpla el LMP de turbiedad (5 NTU) y el LMP de color (15 UCV), de acuerdo a lo establecido en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010).

5. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de los parámetros físico químico iniciales de calidad de agua son: el parámetro de turbiedad supera (el menor nivel es de 58 UNT) los LMP (5 UNT), al igual que los parámetros color y hierro; siendo el valor obtenido de 70,2 UCV escala Pt/Co y 0,56 mg/L respectivamente en comparación con los ECAS establecidas en el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM (2015), (15 UCV escala Pt/Co y 0,30 mg/L respectivamente). Los parámetros conductividad, STD, pH y manganeso no superan los LMP.

La relación de los niveles de hierro supera los niveles establecidos en el Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM (2015) y en el Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010); siendo en mayor valor de diferencia de 0,26 mg/L y el menor de 0,08 mg/L, excediendo en 33% aproximadamente. Respecto a los niveles de manganeso dichos valores no superan los Límites Máximos Permisibles de parámetros de calidad de agua para consumo humano (0,4 mg Mn/L), de acuerdo a lo establecidos en Decreto Supremo N.º 031-2010-SA (2010).

Los parámetros físico químico finales de calidad de agua a través de la dosis óptima de sulfato de aluminio al 1% de solución madre se pudo establecer los parámetros finales una turbiedad 1,73 NTU, pH 7,49 y de hierro 0,16 mg/L. Se observa, que en los ensayos 5, 6, 7, 8 realizados son buenos después de haber utilizado el sulfato de aluminio granulado tipo A donde los parámetros se encuentran dentro del rango que nos indican los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP). En efecto, no existe una correlación lineal entre la dosis óptima aplicada del coagulante y la turbiedad del agua cruda dado que en los ensayos experimentales se obtuvieron resultados con dosificaciones mayores en muestras de turbiedad bajas, mientras que en turbiedades altas se emplean dosificaciones menores.

La propuesta de diseño de dosificación óptima del coagulante - floculante para el tratamiento convencional del agua del acuífero con sulfato de aluminio al 1% de solución madre arroja una concentración óptima de 25 mg/L.

FINANCIAMIENTO

La investigación ha sido financiada por la Universidad Nacional de San Martín a través del "Concurso de Proyectos de Investigación Científica – Tecnológica e Innovación de la UNSM-T, período 2015" según Resolución de Consejo Universitario N° 138-2015-UNSM/CU-R/NLU.

CONFLICTO DE INTERESES

El presente artículo no presenta conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A. y Azabache Aliaga, R.: Conceptualización.

Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A. y Azabache Aliaga, R.: Curación de datos.

Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A. y Azabache Aliaga, R.: Análisis formal.

Olano-Arévalo, R. y Tuesta-Casique, A.: Investigación.

Olano-Arévalo, R., Tuesta-Casique, A. y Azabache Aliaga, R.: Metodología.

Tuesta-Casique, A.: Supervisión.

Olano-Arévalo, R.: Validación.

Tuesta-Casique, A. y Azabache Aliaga, R.: Redacción (borrador original).

Olano-Arévalo, R.: Redacción (revisión y edición).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Bastida, C. (2018). *Impacto del carácter corrosivo iónico y por dióxido de carbono del agua en materiales de acero al carbón de un sistema de abastecimiento de agua potable en el Municipio de Toluca* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/94960>
- Bora, A. J., Mohan, R., & Dutta, R. K. (2018). Simultaneous removal of arsenic, iron and manganese from groundwater by oxidation-coagulation-adsorption at optimized pH. *Water Supply*, 18(1), 60–70. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.092>
- Chang-Long, F., Liu, C., YU, M.-Y., Chen, S.-Q., & Mehmood, T. (2022). Removal performance and mechanism of the dissolved manganese in groundwater using ultrafiltration coupled with HA complexation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108931. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108931>
- Cruz Monzon, J. A., Padilla Guzman, M., & Azabache Liza, Y. F. (2011). *Efecto del proceso de coagulación floculación, en la remoción del hierro (II), presente en las aguas de la quebrada Juninguillo, Moyobamba* [Universidad Nacional de San Martín]. <http://hdl.handle.net/11458/2821>
- Decreto Supremo N.º 031-2010-SA. (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Ministerio de Salud (26 de Setiembre de 2010)*. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>
- Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM. (2015). Modifican los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación. *Ministerio Del Ambiente (19 de Diciembre de 2015)*. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-015-2015-minam/>
- Du, X., Liu, G., Qu, F., Li, K., Shao, S., Li, G., & Liang, H. (2017). Removal of iron, manganese and ammonia from groundwater using a PAC-MBR system: The anti-pollution ability, microbial population and membrane fouling. *Desalination*, 403, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.03.002>
- Galindo Yantas, G. (2018). *Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio granulado tipo b en la planta de tratamiento de agua potable Yurajhuanca – emapa Pasco* [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/347>
- Guillen-Rivas, J. R., Jaramillo-Cedeño, A. R., Baquerizo-Crespo, R. J., & Córdova-Mosquera, R. A. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: una revisión.

Polo Del Conocimiento, 6(9), 1384–1407. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3118>

- Hernández González, S., Gómez Vega, A., Juárez Yáñez, P., & Hernández Zárate, G. (2017). Determinación de hierro y manganeso en el agua subterránea del municipio de Apan, Hidalgo, México. *Revista de Divulgación Científica*, 5(1). http://reaxon.utleon.edu.mx/Art_Determinacion_de_hierro_y_manganeso_en_el_agua_subterranea_del_municipio_de_Apan_Hidalgo_Mexico.html#
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). Interamericana editores, S.A.
- Kang, H., Liu, Y., Li, D., & Xu, L. (2022). Study on the Removal of Iron and Manganese from Groundwater Using Modified Manganese Sand Based on Response Surface Methodology. *Applied Sciences*, 12(22), 11798. <https://doi.org/10.3390/app122211798>
- PNUD. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible - Objetivo 6: Agua Limpia y Saneamiento*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#agua-limpia-saneamiento>
- Ruiz Martínez, A., & Coronado Coronel, M. (2016). Tratamiento de agua subterránea mediante la utilización de ósmosis inversa para consumo familiar en el sector Chuina, Morales-San Martín-2015. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 2(2), 1.10. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/621/0
- Sandoval Salazar, N. R., Bravo Mori, J., & Iñapi Bardalez, E. (2020). *Mejoramiento del sistema de agua potable de la localidad de Yantaló provincia de Moyobamba región San Martín* [Universidad Nacional de San Martín]. <http://hdl.handle.net/11458/4254>
- SENA. (2020). *Operación y mantenimiento de tratamiento de agua residual*. Servicio Nacional de Aprendizaje. <https://normograma.sena.edu.co/normograma/docs/arbol/1000.htm>
- Sierra Ramírez, C. A. (2021). *Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico* (1st ed.). Ediciones de la U.
- Swistock, B., & William Sharpe, P. D. (2019). Iron and Manganese in Private Water Systems. In *Private well water in connecticut* (pp. 1–4). PennState Extension. <https://extension.psu.edu/iron-and-manganese-in-private-water-systems>
- UNESCO. (2021). *Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: El valor del agua* (1st ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Valeriano-Mamani, J. J., & Matos-Chamorro, R. A. (2019). Influencia de la Goma de Tara (*Caesalpinia spinosa*) como Ayudante en el Proceso de Coagulación-Floculación para la Remoción de Turbidez de una Suspensión Artificial de Bentonita. *Información Tecnológica*, 30(5), 299–308. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500299>
- Zevi, Y., Dewita, S., Aghasa, A., & Dwinandha, D. (2018). Removal of Iron and Manganese from Natural Groundwater by Continuous Reactor Using Activated and Natural Mordenite Mineral Adsorption. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 111, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/111/1/012016>