

Acción coagulante de la tuna, tara, mashua en el tratamiento de aguas del Rio Ichu, Huancavelica 2020

Coagulant action of the prickly pear, tara, mashua in the water treatment of the Ichu River, Huancavelica 2020

Recibido: 19 de septiembre de 2022 | Revisado: 22 de octubre de 2022 | Aceptado: 25 de octubre de 2022

Juan Charapaqui Ancasi¹
Vicenta Irene Tafur Anzualdo²

Abstract

The objective of this research was to determine the incidence of the coagulating action of prickly pear, tara and mashua in the treatment of water from the Ichu River in Huancavelica. Water quality monitoring was carried out in the laboratories of the Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM]. The parameters measured were electrical conductivity, total dissolved solids, pH, color, turbidity and sludge volume; continuing the tests of jars with synthetic water of turbidity of 160 UNT. In the first phase the tests were carried out using aluminum sulfate as a primary coagulant and in a second phase aluminum sulfate was used as a primary coagulant and adding tara gum, prickly pear and mashua as natural polymers to improve their performance. Whose results are, the decantation rate with the aluminum sulfate coagulant was 29 m³/m²//d and the sedimentation speed 0.034 cm/s; adding the tara gum coagulant aid to the water resulted in 34 m³/m²//d and 0.039 cm/s, adding prickly pear gum to the water sample resulted in 30 m³/m²/d and 0.035 cm/s, finally adding the prickly pear starch mashua was 68 m³/m²/d and 0.079 cm/s, respectively. It is concluded that the coagulating action of the tare, prickly pear and mashua, allow to make water drinkable for human consumption.

Keywords: Natural polymers, aluminum sulfate, water treatment, coagulants, flocculation.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la incidencia de la acción coagulante de la tuna, tara y mashua en el tratamiento de aguas del Río Ichu en Huancavelica. Se realizó el monitoreo de calidad de agua, en los laboratorios de Universidad Nacional Agraria La Molina [UNALM]. Los parámetros medidos fueron conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, pH, color, turbidez y volumen de lodos; continuando las pruebas de jarras con agua sintética de turbiedad de 160 UNT. En la primera fase se realizó las pruebas utilizando el sulfato de aluminio como coagulante primario y en una segunda fase se usó el sulfato de aluminio como coagulante primario y agregando la goma de tara, tuna y mashua como polímeros naturales para mejorar su rendimiento. Cuyo resultados son, la tasa de decantación con el coagulante sulfato de aluminio fue 29 m³/m²//d y la velocidad de sedimentación 0.034 cm/s; agregando al agua el ayudante de coagulante goma de tara resulto 34 m³/m²//d y 0.039 cm/s, adicionando a la muestra de agua la goma de tuna resultó 30 m³/m²/d y 0.035 cm/s, finalmente agregando el almidón de mashua resultó 68 m³/m²/d y 0.079 cm/s, respectivamente. Se concluye que la acción coagulante de la tara, tuna y mashua, permiten potabilizar el agua para el consumo humano.

Palabras Clave: Polímeros naturales, sulfato de aluminio, tratamiento de aguas, coagulantes, floculación.

Este artículo es de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International



¹ Escuela Universitaria de Posgrado – UNFV. Lima, Perú
Correo: jchara03@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0001-7366-835X>

² Escuela Universitaria de Posgrado – UNFV. Lima, Perú
Correo: itafuranzualdo@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1888-7848>

<https://doi.org/10.24039/rcvp2022121667>

Introducción

La disponibilidad de calidad del agua, ya sea superficial o subterránea, se ha deteriorado debido a factores como el aumento de la población, la industrialización, la urbanización (Tyagi et al., 2013). La calidad y cantidad del agua son temas más importantes en la gestión de los recursos hídricos (Sutadian et al., 2016); su clasificación basada en el grado de pureza y contaminación data de 1848 (Medeiros et al., 2017) y se evalúa desde las características físicas, químicas y microbiológicas (Rangeti et al., 2015). La gran variedad de factores y parámetros que afectan la calidad del agua hace que su evaluación sea una tarea compleja (Sutadian et al., 2016).

El agua que es consumida por el ser humano, debe cumplir con parámetros de calidad, inocuidad y con expectativas en cuanto al sabor y olor (Rahman, 2017). Las pruebas, diseños y análisis deben abordarse de manera que permitan optimizar la sensibilidad, validez y confiabilidad (Burlingame, 2017).

Para llevar a cabo la evaluación de calidad del agua de un cuerpo hídrico es necesario monitorear sus características físicas, químicas y microbiológicas (Sierra, 2011). La Ley General del Ambiente establecida por el Ministerio del Ambiente (MINAM), define Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como “la medida que establece el nivel de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no presenta riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”.

La disponibilidad de agua dulce está amenazada por múltiples factores que incluyen la contaminación y el cambio climático. Los hallazgos de la literatura han revelado que los contaminantes de origen natural, con condición impredecible, y de fuentes de erosión a lo largo de los lechos de ríos (Pu, 2019) pueden amenazar las fuentes de agua dulce.

El Río Ichu, ubicado en la provincia y en la región de Huancavelica, es el recurso hídrico que abastece a los distritos del mismo nombre y otros. Deben cumplir los parámetros para la Categoría III - Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebidas de animales de la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338, según la Resolución Jefatural N° 202-2010- ANA.

El objetivo de la investigación fue determinar la acción coagulante de la tuna, tara y mashua en el tratamiento de aguas del Río Ichu Huancavelica 2021.

Materiales y métodos

Para el diseño del plan de monitoreo fue importante realizar visitas previas de inspección del área para validar la investigación de gabinete realizada. Fue necesario contrastar la información de los mapas con la realidad del momento para establecer el mejor lugar de muestreo o cambiar algunos previstos por dificultades de acceso, y el desarrollo de la parte experimental se efectuó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental UNALM.

La población hídrica y muestra de estudio fueron las aguas del Río Ichu- Huancavelica en el 2021 en la sub cuenca Ichu está comprendida entre las coordenadas UTM (WGS 84 Zona 18) 495822E, 8552783N; 507690E, 8614417N. Altitudinalmente está comprendida entre los: 3 100 a 5 100 m.s.n.m., con un área de 1 383,17 km², perímetro de 219,71 km., y con una longitud de cauce principal de 102,96 km.

Procedimientos

Para cumplir con los objetivos establecidos en la investigación, se trabajó con las siguientes fases (para los tres polímeros):

Pruebas de jarras del proceso de coagulación-floculación Materiales y reactivos

Materiales y reactivos

a. Agua cruda utilizada en las pruebas. Las pruebas de coagulación-floculación se realizaron utilizando las aguas colectadas en el Río Ichu. Previamente en cada prueba del laboratorio, el agua cruda se caracterizó midiendo los parámetros: pH, turbiedad, conductividad eléctrica, color y sólidos suspendidos totales. Se obtuvo la muestra de tierra de la rivera del Río Ichu y al mismo tiempo se aumentó el grado de turbiedad del agua, se disolvió en un litro de agua hasta alcanzar 160 UNT.

b. Coagulantes y floculantes. Se contactaron a los principales proveedores de coagulantes y floculantes en Perú (en particular de sulfato de aluminio; goma de tara y tuna, almidón de mashua).

c. Pruebas de coagulación-floculación. Los experimentos de coagulación- floculación se llevaron a cabo mediante pruebas de jarras en el periodo 2021.

d. Diseño de experimentos. Cada objetivo específico corresponde al desarrollo de un

experimento para el logro del objetivo general.

Experimento 1: Evaluar la variabilidad de los parámetros físicos y químicos del agua superficial cruda del río Ichu a nivel de laboratorio de análisis de calidad de aguas.

Experimento 2: Determinar la mejor combinación y dosis óptima de coagulante- floculante para la remoción de color, sedimentos y turbiedad del agua cruda en el Río Ichu; a través de la prueba de jarras.

Procedimiento generalizado para el sulfato de aluminio

Etapa I – Dosis óptima, concentración óptima y pH óptimo de sulfato de aluminio

1. En la primera etapa se realizó las pruebas de jarras para determinar la dosis óptima del coagulante primario sulfato de aluminio, agregándole diversas dosis de coagulante a cada una de las jarras que contenían agua con la turbiedad establecida. La dosis obtenida en la jarra fue el que arroja menor turbiedad.
2. Se procedió a efectuar las pruebas para hallar la concentración óptima y pH óptimo del coagulante respectivamente, con la dosis óptima ya obtenida.
3. Esta dosis óptima de sulfato de aluminio se tomó en cuenta más adelante para obtener la dosis de polímero.

Etapa II – Floculación

1.- Establecido la dosis y concentración óptima del coagulante sulfato de aluminio se procedió a realizar las pruebas de floculación con las gradientes de 80, 60, 40 y 20 s-1. Luego de iniciada la floculación, al cabo de 5 minutos se retiró la primera jarra, se colocó el tomador de muestra y se dejó sedimentar durante 10 minutos, al cabo del cual se procedió a medir la turbiedad, obteniéndose los resultados mostrados en las tablas. Cada 5 minutos de intervalos, se retiró en forma consecutiva las demás jarras y se procedió con cada una de un modo similar al de la primera jarra.

2.- Se determina la turbiedad residual (T_f) de cada muestra, se calcula la eficiencia remocional (T_f/T_0) y se registran los datos en el grafico Turbiedad (UNT) vs Tiempo (min); este grafico permite obtener tiempo de floculación total.

3.- A continuación, se graficó la “Turbiedad vs Gradiente de velocidad”, la cual nos permite ubicar los puntos de máxima remoción en cada curva de tiempo, obteniéndose las gradientes de velocidad con los que cada tiempo de retención se optimiza.

4.- Estos puntos nos permiten obtener la ecuación de la curva, mas aproximada, se procede a utilizar el método de mínimos cuadrados.

5.- Se determinan los valores de “a”, “b” y el grado de ajuste “R²”. El grado de ajuste es aceptable si ($R^2 > 0,80$), se continua el cálculo.

6.- Con los valores obtenidos, se determina el gradiente óptimo, aplicando la ecuación que es la expresión:

$$G^n T = K$$

“n” y “k” se determina como consecuencia del presente estudio. Con lo cual se obtiene la gráfica Gradiente (s-1) vs Tiempo de retención (min).

7.- Esta ecuación y el tiempo de floculación total permite hallar las gradientes óptimas de floculación para cada tramo, para luego pasar a la etapa de decantación.

Etapa III – Decantación

1. Se programó la memoria del equipo de prueba de jarra, con los valores de gradientes de velocidad obtenidos en la etapa de floculación y tiempos de mezcla seleccionados.

2. Terminada la floculación, detener el equipo, retirar cada vaso, colocar los flotadores para tomar la muestra, sin producir perturbaciones en las suspensiones. Medir las profundidades de los tubos de succión de los flotadores (altura es 6 cm), el cual es la profundidad de toma de muestra.

3. En el proceso de sedimentación se tomó las muestras en diferentes momentos que fueron a 1, 2, 3, 4, 5, 10 min. Para las jarras 1, 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

4. Se determinó la turbiedad residual de cada muestra seleccionada con la utilización del equipo multiparámetro.

5. Se calculó los valores de la velocidad de sedimentación (Vs).

$$Vs = \frac{h}{t}$$

6. Se graficó los valores de $C = T_f/T_0$ en las ordenadas y los valores de C_f y a en las abscisas, obteniéndose la curva de sedimentación para la muestra de agua estudiada. De esta grafica se determina los valores de C_f y a.

7. Determinar la remoción total, basado en el criterio de selección de la tasa de decantación, con la siguiente expresión:

$$R_t = (1 - (C - C_f)) + \frac{(a + Vs)}{2xVs} x (C - C_f)$$

8. Calcular la turbiedad removida T_r y la turbiedad final o remanente T_f

$$T_r = R_t x T_0$$

$$T_f = T_0 - T_r$$

9. Determinar la tasa de decantación, la cual varía entre (20 a 60 m³/m².d), será aquella tasa que arroje como turbiedad (T_p) menor a 2 UNT, lo cual es la máxima que se puede permitir para ingreso a la unidad de filtración.

Resultados

Se trabajó con calidad de agua cuya turbidez máxima fue de 160 UNT (unidades nefelométricas de turbidez).

Dosis, concentración y pH óptimo del sulfato de aluminio

a) Dosis óptima

-Calidad de agua cruda

En la Tabla 1 se muestra los datos del agua cruda o agua bruta, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, velocidades de mezcla y tiempo de decantación; para determinar la dosis de sulfato de aluminio y otros.

Tabla 1

Datos de la mezcla rápida, mezcla lenta y decantación

Mezcla rápida	Mezcla lenta	Decantación
V = 300 rpm T = 10 s	V = 30 rpm Gradiente = 40 s ⁻¹ T = 20 min	T = 10 min.

Nota. Información utilizada para calcular la dosis óptima de sulfato de aluminio, concentración de sulfato de aluminio, pH óptimo, ensayos de floculación y decantación; dosis óptima de goma de tara, sulfato de aluminio con goma de tara, goma de tuna, de sulfato de aluminio con goma de tuna, almidón de mashua, sulfato de aluminio con almidón de mashua.

Tabla 2

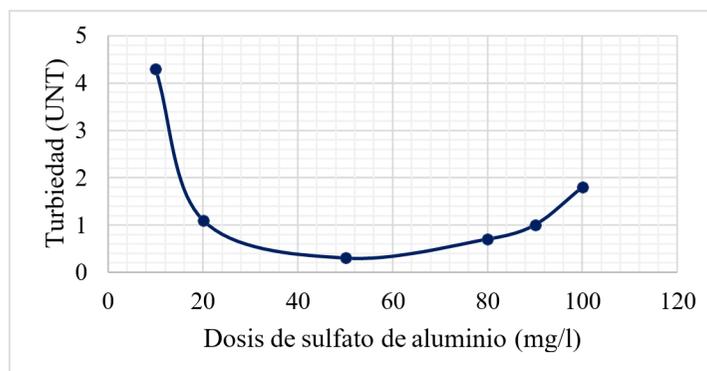
Datos para calcular la dosis óptima de sulfato de aluminio

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio	Variable
pH	7.34	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2
Alcalinidad (mg/l)	120		

Nota. La dosis óptima del sulfato de aluminio fue 50 mg/l, se observa en la Figura 1.

Figura 1

Dosis óptima de sulfato de aluminio



Nota. La dosis óptima del sulfato de aluminio fue 50 mg/l, se observa en la Figura 1.

b) Concentración óptima de sulfato de aluminio

-Calidad de agua cruda

La Tabla 3 muestra los datos del agua cruda o agua bruta, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, para la determinación de la concentración de sulfato de aluminio.

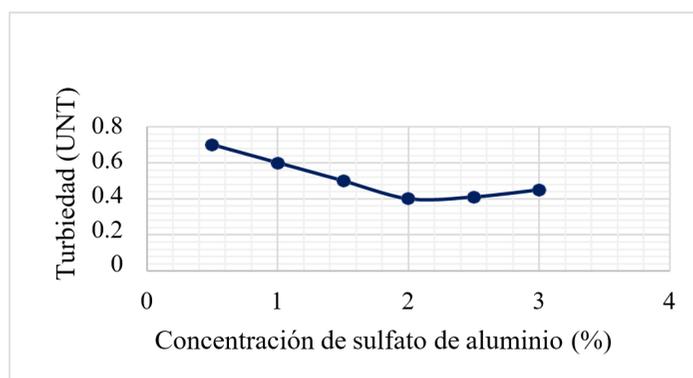
Tabla 3

Datos para calcular la concentración de sulfato de aluminio

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	50
pH	7.34	Concentración de sulfato de aluminio	Variable
Alcalinidad (mg/l)	120		

Figura 2

Datos de la mezcla rápida, mezcla lenta y decantación



Nota. En la Figura 2 se observa que con una dosis óptima de 50 mg/l de sulfato de aluminio se obtuvo una concentración óptima de 2 %, con una turbiedad de 0.4 UNT.

c) pH ptimo

-Calidad de agua cruda

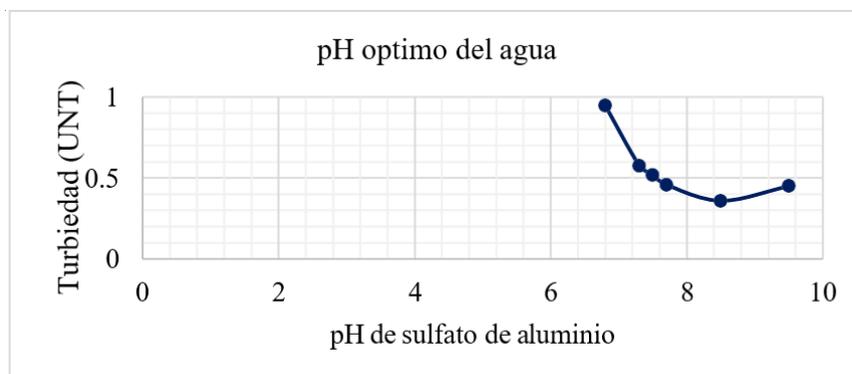
En la Tabla 4 se muestra los datos del agua cruda o agua bruta, es decir aquella que no ha recibido ningún tratamiento la muestra de agua, dosis y concentración del sulfato de aluminio; para la determinación del pH óptimo.

Tabla 4

Datos para calcular el pH óptimo, ensayo de floculación y decantación

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	50
pH	Variable	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2
Alcalinidad (mg/l)	120		

Figura 3
pH óptimo sulfato de aluminio



Nota. En la Figura 3 se observa que con una dosis óptima de 50 mg/l y concentración de 2% de sulfato de aluminio, se obtuvo un pH óptimo de 8,5, para una turbiedad de 0,36 UNT.

Etapa de floculación

-Calidad de agua cruda

En la Tabla 2 se muestra los datos del agua cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, dosis y concentración del sulfato de

aluminio para el ensayo de floculación y decantación.

Se ensayo para gradientes de velocidad de 80, 60, 40, y 20 s⁻¹ y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente; el resultado se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5
Resultados del ensayo de floculación

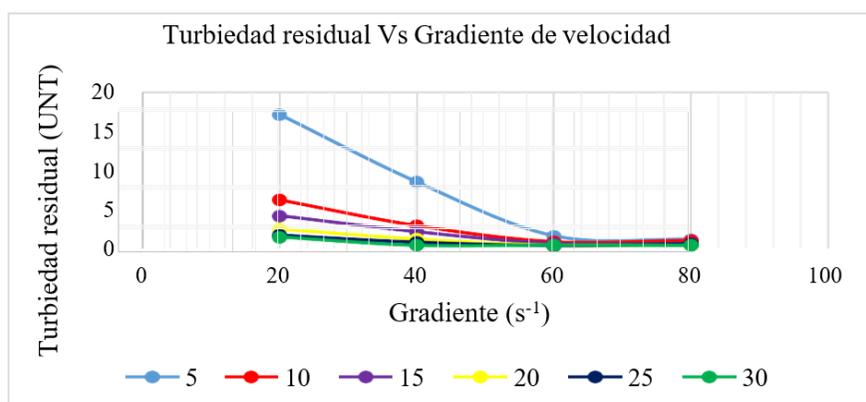
Grupos	G (s ⁻¹)	V (rpm)	Tiempo (min)					
			5	10	15	20	25	30
G1	80	55	1,10	0,95	0,56	0,41	0,51	0,34
G2	60	45	1,56	0,80	0,57	0,33	0,30	0,38
G3	40	35	8,46	2,86	2,09	1,15	0,73	0,34
G4	20	20	17,1	6,16	4,14	2,43	1,65	1,41

Nota. De la Figura 4, la curva más baja del gráfico es G₂ = 60 s⁻¹ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Se observa que la gradiente de velocidad variar en forma uniformemente decreciente. Esta dentro del

rango porque el tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos, dependiendo del tipo de unidad y de la temperatura del agua.

Figura 4
Turbiedad residual vs gradiente de velocidad



Se obtienen los gradientes de velocidad con los que cada tiempo de retención optimiza, se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6
Gradientes de velocidad óptima de floculación

t(min)	5	10	15	20	25	30
G(t-1)	70	70	60	60	50	50

Nota. Aplicando mínimos cuadrados se obtiene el grado de ajuste: $R^2 = 0,91$

Etapa de decantación

Este procedimiento físico en el que se separó por gravedad los sólidos provistos de mayor densidad de otro que, al tener menor densidad, ocupó la parte superior de la mezcla heterogénea.

-Calidad de agua cruda

Las Tablas 2 y 4 muestran los datos del agua

cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, velocidades de mezcla, tiempo de decantación, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de decantación.

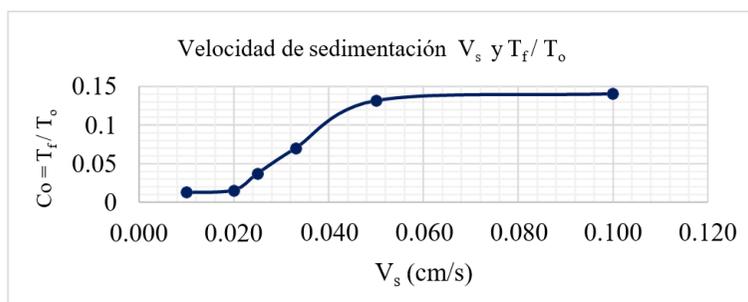
Las Tablas 7 y Figura 5 muestran los resultados de ensayo de la decantación, el cual es un método físico utilizado para la separación de mezclas heterogéneas, usado para separar sólidos de líquidos.

Tabla 7
Resultados de ensayo de decantación

Jarra	Tiempo (min)	Velocidad (cm/s)	T_r (Turbidez) (UNT)	T_r/T_o
1	1	0.100	22.5	0,140625
2	2	0.050	21.1	0,131875
3	3	0.033	11.2	0,070000
4	4	0.025	5.99	0,037438
5	5	0.020	2.54	0,015875
6	10	0.010	2.03	0,012688

Nota. De la Figura 4, la curva más baja del gráfico es $G_2 = 60 \text{ s}^{-1}$ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Figura 5
Curva de sedimentación



Nota. En la tabla 8 los resultados de la tasa decantación con sulfato de aluminio fue 0,987.

Tabla 8*Selección de la tasa de decantación*

$q_s(\text{m/d})$	$V_s(\text{cm/s})$	C_o	$1-(C_o-C_f)$	R_f	T_f	T_f
28	0,032	0,062	0,95	0,9889	158,22	1,78
29	0,034	0,065	0,947	0,9877	158,03	1,97
30	0,035	0,077	0,935	0,9843	157,50	2,50

Nota. De la Figura 4, la curva más baja del gráfico es $G_2 = 60 \text{ s}^{-1}$ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Dosis óptima goma de tara – reducción sulfato de aluminio

Se muestran en la Tabla 9 los datos del agua cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua; para determinar la dosis óptima de goma de tara.

a) Dosis óptima goma de tara

-Calidad de agua cruda

Tabla 9*Datos para el cálculo de dosis óptima de goma de tara*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	50
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de goma de tara (%)	0,2
		Dosis óptima goma de tara (mg/l)	Variable

Nota. El resultado de la dosis óptima de goma de tara fue de 3 mg/l, tal como se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10*Dosis óptima de goma de tara*

Dosis (mg/l)	1	2	3	4	5	6
Turbiedad (UNT)	1.66	1.23	0.84	1.20	1.48	1.62

Nota. El resultado de la dosis óptima de goma de tara fue de 3 mg/l, tal como se puede observar en la Tabla 10.

b) Reducción del sulfato de aluminio

-Calidad de agua cruda

En la Tabla 11 se muestran los datos del agua cruda o agua bruta, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio con goma de tara.

Tabla 11*Datos para el cálculo de dosis óptima de sulfato de aluminio con goma de tara*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio	Variable
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de goma de tara (%)	0,2
		Dosis óptima de goma de tara (mg/l)	3

Nota. En la Tabla 12 se observa la dosis reducida de sulfato de aluminio con goma de tara de 20 mg/l, para una turbiedad de 0.46 UNT.

Tabla 12*Reducción de sulfato de aluminio con goma de tara*

Dosis (mg/l)	20	22	24	26	28	30
Turbiedad (UNT)	0.46	0.60	0.54	0.72	0.48	0.71

Nota. El resultado de la dosis óptima de goma de tara fue de 3 mg/l, tal como se puede observar en la Tabla 10.

Etapa de floculación con goma de tara

- *Calidad de agua cruda*

En la Tabla 13 se muestran los datos del agua cruda, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de floculación y decantación con goma de tara.

Tabla 13*Datos para el cálculo de ensayo de floculación y decantación con goma de tara*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	20
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de goma de tara (%)	0,2
		Dosis optima goma de tara (mg/l)	3

Nota. Se ensayó para gradientes de velocidad de 80, 60, 40, y 20 s⁻¹ y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente; el resultado se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14*Resultados de ensayo de floculación con goma de tara*

Grupos	G (s ⁻¹)	V (rpm)	Tiempo (min)					
			5	10	15	20	25	30
G1	80	55	2,93	1,28	2,99	2,43	2,72	3,07
G2	60	45	2,94	1,48	1,35	1,2	0,76	1,24
G3	40	35	9,53	3,65	1,63	1,35	1,15	1,04
G4	20	20	16	7,66	3,93	2,59	2,65	1,55

Nota. Se ensayó para gradientes de velocidad de 80, 60, 40, y 20 s⁻¹ y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente; el resultado se muestra en la Tabla 14.

En la Tabla 15, el valor más bajo de la gradiente es G2 = 60 s⁻¹ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Tiempo total de floculación = 25 minutos

Se observa que la gradiente de velocidad variar en forma uniformemente decreciente. Estamos dentro del rango porque el tiempo de retención puede variar de 10 a 30 minutos.

Tabla 15*Datos para el cálculo de ensayo de floculación y decantación con goma de tara*

t(min)	5	10	15	20	25	30
G(t-1)	80	70	60	60	50	50

Nota. Aplicando mínimos cuadrados se obtiene el grado de ajuste: R² = 0,92

Etapa de decantación con goma de tara

Es el procedimiento físico en el que se separó por gravedad los sólidos provistos de mayor densidad de otro que, al tener menor densidad, ocupó la parte superior de la mezcla.

-Calidad de agua cruda

En la Tabla 11 se muestran los datos del agua cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento la muestra de agua, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de decantación con goma de tara.

En la Tabla 16, se muestran los resultados de ensayo de la decantación con goma de tara.

Tabla 16

Resultados de ensayo de decantación con goma de tara

Jarra	Tiempo (min)	Velocidad (cm/s)	T _r (Turbidez) (UNT)	T _r /T _o
1	1	0.100	14,1	0.088
2	2	0.050	8,7	0.054
3	3	0.033	4,2	0.026
4	4	0.025	2,9	0.018
5	5	0.020	1,7	0.011
6	10	0.010	0,9	0.006

Nota. En la Tabla 17 se muestran los resultados de la tasa decantación de sulfato de aluminio con goma de tara, resultando 0,988.

Tabla 17

Selección de la tasa de decantación con goma de tara

q _s (m/d)	V _s (cm/s)	C _o	1-(C _o -C _f)	R _t	T _r	T _f
32	0.037	0.032	0.974	0.9905	158.48	1.52
34	0.039	0.038	0.968	0.9881	158.09	1.91
36	0.042	0.043	0.963	0.9859	157.75	2.25

Dosis óptima goma de tuna – reducción sulfato de aluminio

a) Dosis óptima goma de tuna

-Calidad de agua cruda

Se muestran en la Tabla 18 los datos del agua cruda, para determinar la dosis óptima de goma de tuna.

Tabla 18

Datos para el cálculo de dosis óptima de goma de tuna

Muestra	Coagulantes
Turbiedad (UNT) 160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l) 50,0
pH 8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%) 2,0
Alcalinidad (mg/l) 120	Concentración de goma de tuna (%) 0,2
	Dosis optima de goma de tuna Variable

Nota. El resultado de la dosis óptima de goma de tuna fue de 5 mg/l, tal como se puede observar en la Tabla 19.

Tabla 19*Dosis óptima de goma de tuna*

Dosis (mg/l)	1.5	2.0	3.5	5.0	5.5	6.0
Turbiedad (UNT)	1.6	1.5	1.3	0.7	0.8	1.0

b) Reducción del sulfato de aluminio*-Calidad de agua cruda*

En la Tabla 20 se muestran los datos del agua cruda o agua bruta, para la determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio con goma de tuna.

Tabla 20*Datos para el cálculo de dosis óptima de sulfato de aluminio con goma de tuna*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio reducido	Variable
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2,5
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de goma de tuna (%)	0,2
		Dosis optima de tuna (mg/l)	5,0

Nota. En la Tabla 21 se observa una dosis reducida de sulfato de aluminio con goma de tuna de 28 mg/l, resultando una turbiedad de 0.58 UNT.

Tabla 21*Reducción de sulfato de aluminio con goma de tuna*

Dosis (mg/l)	20	22	24	26	28	30
Turbiedad (UNT)	0.88	0.75	0.73	0.71	0.58	0.66

Etapas de floculación con goma de tuna*-Calidad de agua cruda*

En la Tabla 22 se muestran los datos del agua cruda, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de floculación con goma de tuna.

Tabla 22*Datos para el cálculo de ensayo de floculación y decantación con goma de tuna*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	28,0
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2,5
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de goma de tuna (%)	0,2
		Dosis optima de goma de tuna (mg/l)	5,0

Nota. Se ensayó para gradientes de velocidad de 80, 60, 40, y 20 s⁻¹ y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente; el resultado se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23*Resultados de ensayo de floculación con goma de tuna*

Grupos	G (s ⁻¹)	V (rpm)	Tiempo (min)					
			5	10	15	20	25	30
G1	80	55	2.26	1.74	1.66	1.62	1.6	1.63
G2	60	45	3.83	3.6	3.31	2.76	2.64	2.65
G3	40	35	3.00	1.96	1.49	1.38	1.06	1.12
G4	20	20	6.24	2.42	1.46	1.36	1.01	1.05

En la Tabla 24 la curva más baja del grafico es $G2 = 30 \text{ s}^{-1}$ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Tabla 24*Gradientes de velocidad optima de floculación*

t(min)	5	10	15	20	25	30
G(t-1)	80	80	30	40	30	20

Nota. Aplicando mínimos cuadrados se obtiene el grado de ajuste: $R^2 = 0,78$

Etapa de decantación con goma de tuna

Es el procedimiento físico en el que se separó por gravedad los sólidos provistos de mayor densidad de otro que, al tener menor densidad, ocupa la parte superior de la mezcla.

-Calidad de agua cruda

En la Tabla 1 se muestran los datos del agua

cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, velocidades de mezcla, tiempo de decantación, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de decantación con goma de tuna.

En la Tabla 25 se muestran los resultados de ensayo de la decantación con goma de tuna, el cual es un método físico utilizado para la separación de mezclas heterogéneas, usado para separar sólidos de líquidos.

Tabla 25*Resultados de ensayo de decantación con goma de tuna*

Jarra	Tiempo (min)	Velocidad (cm/s)	T _r (Turbidez) (UNT)	T _r /T ₀
1	1	0.100	22.7	0.1419
2	2	0.050	17.8	0.1113
3	3	0.033	5.97	0.0373
4	4	0.025	4.57	0.0286
5	5	0.020	2.26	0.0141
6	10	0.010	1.74	0.0109

Nota. En la Tabla 26 se muestran los resultados de la tasa decantación de sulfato de aluminio con goma de tuna, resultando 0,989.

Tabla 26*Selección de la tasa de decantación con goma de tuna*

q_s (m/d)	V_s (cm/s)	C_o	$1-(C_o-C_f)$	R_t	T_r	T_f
29	0.034	0.038	0.972	0.9902	158.43	1.57
30	0.035	0.040	0.970	0.9893	158.29	1.71
31	0.036	0.041	0.965	0.9874	157.98	2.02

Dosis óptima de almidón de mashua – reducción sulfato de aluminio

a) Dosis óptima de almidón de mashua

-Calidad de agua cruda

Se muestran en la Tabla 27 los datos del agua cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, para determinar la dosis óptima de almidón de mashua.

Tabla 27*Datos para el cálculo de dosis óptima de almidón de mashua*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	50,0
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2,0
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de almidón de mashua (%)	0,2
		Dosis óptima de almidón de mashua (mg/l)	Variable

Nota. El resultado de la dosis óptima de almidón de mashua fue de 20 mg/l, tal como se puede observar en la Tabla 28.

Tabla 28*Dosis óptima de almidón de mashua*

Dosis (mg/l)	10	20	30	40	50	60
Turbiedad (UNT)	1.04	0.89	1.2	1.29	1.31	1.38

b) Reducción del sulfato de aluminio*-Calidad de agua cruda*

En la Tabla 29 se muestran los datos del agua cruda o agua bruta, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, para la determinación de la concentración óptima de sulfato de aluminio con almidón de mashua.

Tabla 29*Dosis óptima de almidón de mashua*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio reducido	Variable
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2,5
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de almidón de <u>mashua</u> (%)	0,2
		Dosis óptima de almidón de <u>mashua</u> (mg/l)	20,0

Nota. En la Tabla 30 se observa una dosis reducida de sulfato de aluminio con almidón de mashua de 32 mg/l, resultando una turbiedad de 2.17 UNT.

Tabla 30*Reducción de sulfato de aluminio con almidón de mashua*

Dosis (mg/l)	20	24	28	32	36	40	44
Turbiedad (UNT)	5.69	3.75	2.35	2.17	2.25	2.5	3.2

Etapa de floculación con almidón de mashua*-Calidad de agua cruda*

En la Tabla 31 se muestran los datos del agua cruda, aquella que no ha recibido ningún tratamiento de la muestra de agua, dosis y concentración del sulfato de aluminio para el ensayo de floculación con almidón de mashua.

Tabla 31*Datos para el cálculo de ensayo de floculación y decantación con almidón de mashua*

Muestra		Coagulantes	
Turbiedad (UNT)	160	Dosis de sulfato de aluminio (mg/l)	32,0
pH	8,5	Concentración de sulfato de aluminio (%)	2,5
Alcalinidad (mg/l)	120	Concentración de almidón de mashua (%)	0,2
		Dosis optima de almidón de mashua (mg/l)	20,0

Se ensayo para gradientes de velocidad de 80, 60, 40, y 20 s⁻¹ y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos respectivamente; el resultado se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32*Resultados de ensayo de floculación con almidón de mashua*

Grupos	G (s ⁻¹)	V (rpm)	Tiempo (min.)					
			5	10	15	20	25	30
G1	80	55	3.79	1.81	1.61	0.86	1.24	1.46
G2	60	45	4.49	1.53	0.76	1.1	1.08	0.80
G3	40	35	4.92	2.26	1.36	1.23	1.6	0.65
G4	20	20	12.4	5.2	3.95	3.11	2.24	2.67

En la Tabla 33 el valor de G2 = 60 s⁻¹ está indicando que el proceso optimiza en un tiempo de floculación total de 25 minutos.

Tiempo total de floculación = 25 minutos

Tabla 33*Gradientes de velocidad optima de floculación con almidón de mashua*

t(min)	5	10	15	20	25	30
G^(t-1)	80	80	70	70	60	60

Nota. Aplicando mínimos cuadrados se obtiene el grado de ajuste: R² =0,91

Etapa de decantación con almidón de mashua*-Calidad de agua cruda*

Es el procedimiento físico en el que se separó por gravedad los sólidos provistos de mayor densidad de otro que, al tener menor densidad, ocupó la parte superior de la mezcla.

En la Tabla 34 se muestran los resultados de ensayo de la decantación con goma de tuna, el cual es un método físico utilizado para la separación de mezclas heterogéneas, usado para separar sólidos de líquidos.

Tabla 34*Resultados de ensayo de decantación con almidón de mashua*

Jarra	Tiempo (min)	Velocidad (cm/s)	T _r (Turbidez) (UNT)	T _r /T ₀
1	1	0.100	6.14	0.0384
2	2	0.050	4.37	0.0273
3	3	0.033	2.14	0.0134
4	4	0.025	1.33	0.0083
5	5	0.020	1.15	0.0072
6	10	0.010	1.10	0.0069

Nota. En la Tabla 35 se muestran los resultados de la tasa decantación de sulfato de aluminio con almidón de mashua resultando 0,987.

Tabla 35*Selección de la tasa de decantación con almidón de mashua*

q _s (m/d)	V _s (cm/s)	Co	1-(Co-Cf)	R _t	T _r	T _r
64	0.074	0.034	0.973	0.9883	158.13	1.87
68	0.079	0.035	0.972	0.9878	158.04	1.96
72	0.083	0.037	0.970	0.9868	157.89	2.11

Comparación de los resultados obtenidos con el almidón de mashua y los parámetros fisicoquímicos del agua establecidos por las normas vigentes del Perú

Tabla 36*Selección de la tasa de decantación con almidón de mashua*

Parámetro	Calidad agua según reglamento	Mashua		Tuna		Tara	
		Calidad agua crítica	Calidad agua obtenida	Calidad agua crítica	Calidad agua obtenida	Calidad agua crítica	Calidad agua obtenida
Color (Pt-Co)	15	532	8.0	350	10.0	357	25
Volumen lodo (mg/l)	0	0.4	3.2	0.6	6.5	0.8	4
Turbidez (UNT)	5	160	1.1	160	1.5	160	2.03
pH	6.5 - 8.5	7.5	6.7	8.5	7.4	8.5	7.1
Partic. no sedimentables (mg/l)	25 - 50	140	2.0	150	2.4	155	9
Conduc. eléctrica (µS/ml)	1500	395	220.0	630	660.0	636	668

Discusión

Ojeda (2012) realizó una serie de ensayo de jarras únicamente con el almidón de mashua, los resultados no fueron significativos, obteniéndose una turbiedad de 5.7 UNT, un color de 40 U Pt-Co y un pH de 7.92. En el presente trabajo se obtuvo 1.1 UNT, 8 UPt-Co y pH 6.7 respectivamente.

Lozano (2018), en las aguas del río Chonta de Cajamarca; evaluó la eficiencia del mucílago extraído de la Tuna (*Opuntia ficus-indica*) como agente clarificante. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio, con agua turbia con valores de turbidez iniciales de 55 UNT. Los estudios realizados indicaron que el mucílago extraído de la Tuna remueve la turbidez a un 82%

al tratar turbidez inicial de 55 UNT reduciendo a una turbidez final de 10 UNT, en la presente investigación fue 1.5 UNT. Otras informaciones obtenidas fueron:

A. Color. Los valores de color del agua con goma de tara y de tuna; presentan valores de 25 y 10 UPt-Co, respectivamente. Excepto la goma de tara, reportaron valores que están dentro del límite máximo permisible, estipulado en el DS N° 031-2010-SA que es de 15 UPt-Co, siendo apto para el consumo humano.

B. Volumen de lodos. Los valores de los sólidos sedimentables con goma de tara, y tuna; almidón de mashua; varían de 3.2 a 6,5 mg/l, debiendo ser cero para consumo humano. El contenido de sólidos sedimentables de las muestras de agua fueron bajos dado que estuvieron cerca del valor mínimo de cuantificación

del cono de Imhoff; como con el almidón de mashua que se obtuvo 3.2 mg/l.

C. Turbidez. La investigación de (Enrique et al, 2013) logró la remoción de la turbidez del agua del río Magdalena con alumbre (99,80%); siendo la remoción con *Opuntia* menor (93,25%). Mientras que en el presente trabajo los valores de turbidez del agua con goma de tara y de tuna; almidón de mashua fueron de 2.03, 1.5 y 1.1 UNT, respectivamente.

D. pH. En general, el pH del agua con goma de tara y de tuna, almidón de mashua presenta una tendencia a la neutralidad, estando comprendidos los valores observados dentro del rango permisible (pH 6,7 a 7,5). Se ubica dentro del rango requerido en los Límites Máximos Permisibles del Reglamento de la Calidad de Agua para consumo humano fijado en el DS N ° 031-2010-SA y la OMS.

E. Partículas no sedimentables. Los sólidos disueltos y suspendidos presentan valores promedio del orden de 2 a 9 mg/l. Las partículas no sedimentables en el agua presentan ciertas fluctuaciones con goma de tara y de tuna, almidón de mashua, habiéndose presentado valores de 9 mg/l, 2.4 mg/l, 2 mg/l respectivamente.

F. Conductividad eléctrica. Son los valores de la presencia de sales disueltas en el agua que se expresa en la CE que generan los iones de sales disueltas; en tal sentido, dichas mediciones establecen valores del orden de 220 a 668 μ S/cm, siendo los valores relativamente bajo, comparados con la normatividad vigente. Los resultados obtenidos con goma de tara y de tuna, almidón de mashua son 668, 660, 220 μ S/cm, respectivamente. Con los tres ayudantes de coagulantes estudiados, la cantidad de conductividad eléctrica se encuentran por debajo de los valores límite del ECA de agua.

Gradiente

En este trabajo se observó en los ensayos de floculación con goma de tara para una gradiente de 60 s-1 y velocidad de 45 rpm, una turbiedad 0.76 UNT menor a las demás gradientes y con un tiempo total de floculación de 25 minutos; con goma de tuna para una gradiente de 20 s-1 y velocidad de 20 rpm, se registró una turbiedad 0.76 UNT en un tiempo total de floculación de 25 minutos; y con goma almidón de mashua para una gradiente de 40 s-1 y velocidad de 35 rpm, se registró una turbiedad 0.65 UNT en un tiempo total de floculación de 30 minutos.

Tasa de decantación

Aguilar (2010) realizó ensayos con aguas turbias TIPO 390 UNT obtuvo buen rendimiento con la goma de tara, trabajando solo con sulfato de aluminio obtuvo una tasa de decantación $q = 28$ m³/m²/d y la velocidad

de sedimentación de 0.032 cm/s, agregando la goma de tara como ayudante de floculación obtuvo una tasa de $q = 37$ m³/m²/d y la velocidad de sedimentación de 0.043 cm/s, evidenciando una mejora del 32 % en la tasa de decantación. Mientras que en el presente trabajo la tasa de decantación con el coagulante sulfato de aluminio fue 29 m³/m²/d y la velocidad de sedimentación 0.034 cm/s, agregando al agua el ayudante de coagulante goma de tara resulto 34 m³/m²/d y 0.039 cm/s, adicionando a la muestra de agua la goma de tuna resulto 30 m³/m²/d y 0.035 cm/s, también agregando almidón de mashua resulto 68 m³/m²/d y 0.079 cm/s, respectivamente.

Conclusiones

a) La incidencia de la acción coagulante de la goma de tara en el tratamiento de aguas del Río Ichu en Huancavelica fue:

-Los valores de los parámetros físicos y químicos registrados: color 25 U Pt-Co, volumen de lodos 4 mg/l, turbidez 2.03 UNT, pH 7.1, partículas no sedimentables 9 mg/l y la conductividad eléctrica 668 μ S/cm.

-Utilizando como ayudante de floculación fue posible una reducción del sulfato de aluminio de hasta 60%, tasa de decantación $q = 34$ m³/m²/día y velocidad de sedimentación de 0.039 cm/s.

b) La incidencia de la acción coagulante de la goma de tuna en el tratamiento de aguas del Río Ichu en Huancavelica fue:

-Los valores de los parámetros físicos y químicos registrados: color 10 U Pt-Co, volumen de lodos 6.5 mg/l, turbidez 1.5 UNT, pH 7.5, partículas no sedimentables 2.4 mg/l y la conductividad eléctrica 660 μ S/cm.

-Utilizando como ayudante de floculación fue posible una reducción del sulfato de aluminio de hasta 44%, tasa de decantación $q = 30$ m³/m²/día y velocidad de sedimentación de 0.035 cm/s.

c) La incidencia de la acción coagulante del almidón de mashua en el tratamiento de aguas del Río Ichu en Huancavelica fue:

-Los valores de los parámetros físicos y químicos registrados: color 8 U Pt-Co, volumen de lodos 3.2 mg/l, turbidez 1.1 UNT, pH 6.7, partículas no sedimentables 2 mg/l y la conductividad eléctrica 220 μ S/cm.

-Utilizando como ayudante de floculación fue posible una reducción del sulfato de aluminio de hasta 36%, tasa de decantación $q = 68$ m³/m²

día y velocidad de sedimentación de 0.079 cm/s.

Recomendaciones

Se deben investigar los efectos en la salud y el ambiente al usar los coagulantes químicos en el tratamiento del agua, a fin de optar, de ser el caso, por otras alternativas de coagulantes que sean inocuos, y que otorguen beneficios económicos y ambientales.

Referencias

- Aguilar, A. (2010). *Utilización de las semillas de Tara como ayudante de coagulación en el tratamiento de agua* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/495>
- Burlingame, D. (2017). Humans as Sensors to Evaluate Drinking Water Taste and Odor: A Review. *American Water Works Association* (109), 13-22. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0118>
- Cuéllar, H. (2008). Conceptualización de la salud ambiental: Teoría y práctica. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*; 25(4), 403-409. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342008000400010
- Lozano, F. (2018). *Efecto en la disminución de la turbidez en el agua por floculantes de opuntia ficus-indica (tuna) con diferentes procesos de extracción en el río Chonta de Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo]. Repositorio UPAGU. <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/721/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Medeiros, A., Freitas, K., Freitas, K., et al. (2017). Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 156-164. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.002>
- Ojeda, B. (2012). *Determinación de la eficiencia de las características coagulantes y floculantes del tropaeolum tuberosum, en el tratamiento del agua cruda de la planta de Puengasí de la EPMAPS* [Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador]. Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/3866>
- Pu, J. (2019). Turbulent rectangular compound open channel flow study using multi-zonal approach. *Environmental Fluid Mechanics* 19(3), 785–800. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10652-018-09655-9>
- Rahman, B. (2017). *Quality Assessment of the Non-Carbonated Bottled Drinking Water Marketed in Bangladesh and Comparison with Tap Water*. Edit. Elsevier.
- Rangeti, I., Dzwauro, B., Barratt, G., et al. (2015). Ecosystem-specific water quality indices. *African Journal of Aquatic Science*, 40(3), 227-234. <http://doi.org/10.2989/16085914.2015.1054341>
- Sierra, C. (2011). *Calidad del Agua - Evaluación y Diagnostico*. Temis.
- Sutadian, A., Muttill, N., Yilmaz, A., et al. (2016). Development of river water quality indices a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(58). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., et al. (2013). Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 34-38. <http://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>