

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Desinfección solar de aguas para consumo humano en el marco del desarrollo sostenible en condiciones altoandinas

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Yelitza Mamani Benavente

Jhan Carlos Arratea Juli

Asesor:

Msc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, febrero de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

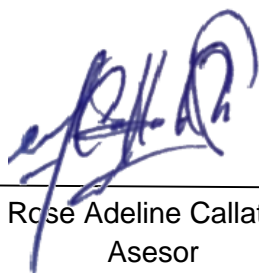
Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

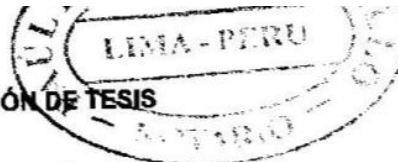
Que el presente informe de investigación titulado: **“DESINFECCIÓN SOLAR DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO EN EL MARCO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE EN CONDICIONES ALTOANDINAS”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres **Jhan Carlos Arratea Juli** y **Yelitza Mamani Benavente** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 03 días del mes de abril del año 2022



Msc. Rose Adeline Callata Chura
Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 10 día(s) del mes de febrero del año 2022, siendo las 11:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Alex Danny Shambi Rodríguez, el secretario: Mtro Juan Eduardo Vige Rivera y los demás miembros: Ing. Verónica Haydee Rivi Mamani y el asesor Msc. Rose Adeline Gallata Ghura

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Desinfección solar de aguas para consumo humano en el marco del desarrollo sostenible en condiciones altoandinas

de el(los)/a(las) bachiller(es): a) Yelitza Mamani Benavente b) Ivan Carlos Avratea Juli

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(la)(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yelitza Mamani Benavente

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	15	B-	Buena	Muy Buena

Candidato (b): Ivan Carlos Avratea Juli

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	15	B-	Buena	Muy Buena

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente


Secretario

Asesor

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Desinfección solar de aguas para consumo humano en el marco del desarrollo sostenible en condiciones altoandinas

Solar disinfection of water for human consumption within the framework of sustainable development in high Andean conditions

Jhan Carlos Arratea Juli^{1*}, Yelitza Mamani Benavente², Rose Adeline Callata Chura³

^{1,2,3} Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Salida Arequipa Km6

*autor correspondiente jhan.aj@upeu.edu.pe

Resumen

Según el reporte de la ONU 159 millones de personas a nivel mundial consumían aguas sin tratar y esto era la principal causa de enfermedades diarreicas agudas y muertes en niños menores a 5 años. El objetivo de la investigación fue desinfectar aguas para consumo humano mediante radiación solar en condiciones altoandinas en el marco del desarrollo sostenible. Para el estudio se recolectaron 2000 mL de agua subterránea en botellas de vidrio estériles, y se analizaron mediante dos ensayos experimentales, el primero consta de un estudio de seis días con cuatro tratamientos de 3 horas, el segundo se hizo durante un día con seis tratamientos. Los resultados del primer ensayo experimental muestran que desde las 11:00 a 14:00 horas existe una mejor inactivación bacteriana del 95% y sus resultados fueron corroborados con los modelos estadísticos de Duncan y Tukey, el segundo ensayo demostró que a las 3 horas existe una inactivación del 90.91% y a seis horas la desinfección alcanza el 100%, la cinética de Chick presentó una cinética de primer orden cuyo coeficiente cinético es de 0.4509. se concluye que el método de desinfección solar en condiciones altoandinas es un método eficiente para tratar aguas subterráneas con presencia de *E. Coli*, además que este método reducirá las enfermedades causadas por la ingesta de agua sin tratar y mejorará la calidad de vida de muchas personas reduciendo la pobreza y apuntado a una mejor calidad de vida en pro de un desarrollo sostenible.

Palabras clave: Radiación solar, *E. Coli*, desarrollo sostenible, tiempo de desinfección, desinfección solar.

Abstract

According to the ONU report, 159 million people worldwide consumed untreated water and this was the main cause of acute diarrheal diseases and deaths in children under 5 years of age. The objective of the research was to disinfect water for human consumption through solar radiation in high Andean conditions within the framework of sustainable development. For the study, 2000 mL of groundwater were collected in sterile glass bottles, and analyzed by means of two experimental trials, the first consists of a six-day study with four 3-hour treatments, the second was carried out during one day with six treatments. The results of the first experimental trial show that from 11:00 a.m. to 2:00 p.m. there is a better bacterial inactivation of 95% and their results were corroborated with the statistical models of Duncan and Tukey, the second trial showed that at 3 hours there is an inactivation of 90.91% and at six hours the disinfection reaches 100%, Chick's kinetics presented a first order kinetics whose kinetic coefficient is 0.4509. It is concluded that the solar disinfection method in high Andean conditions is an efficient method to treat groundwater with the presence of *E. Coli*, in addition that this method will reduce diseases caused by the intake of untreated water and will improve the quality of life of many people. reducing poverty and aimed at a better quality of life in favor of sustainable development.

Keywords: Solar radiation, *E. Coli*, sustainable development, disinfection time, solar disinfection.

1. Introducción

La organización de las naciones unidas (ONU) en el año 2015 reportó que más de 159 millones de personas a nivel mundial consumían agua sin ningún tipo de tratamiento (UNESCO, 2019), por estas razones la ONU en la Asamblea General de las Naciones Unidas, formuló la agenda de desarrollo sostenible a fin de mejorar la calidad de vida de las poblaciones vulnerables (ONU, 2015), el mismo año el 20% de la población que habitaba en las zonas rurales de Latinoamérica y el Caribe consumían aguas abastecidas por ríos, lagunas y pozos, que no garantizaban una buena calidad (Mejía et al., 2016), el consumo del agua sin tratar trae consigo la ingesta de microorganismos como, bacterias mesófilas, Coliformes totales (CT), Coliformes fecales (CF), *Escherichia Coli* y *Streptococos Fecales*, los cuales están asociados con las enfermedades gastrointestinales, enfermedades diarreicas agudas (EDAs) y muertes en niños menores a 5 años (Feria et al., 2020; Gómez, 2014).

En el Perú existen comunidades y asentamientos que tienen que ingeniárselas para conseguir agua, muchos se abastecen de pozos artesanales, ríos, acequias o manantiales, la mayoría de estas fuentes de agua son de inadecuada calidad y su provisión no es segura (Ballesteros et al., 2005; CASMA, 2015), en el año 2010 en la ciudad de Juliaca 72 617 habitantes incurrieron al consumo de agua de pozo y de algunas fuentes superficiales que no garantiza un agua segura (INEI et al., 2010; SILVA, 2019). Además, en un estudio realizado en la urbanización Niño San Salvador y Santa Adriana de la ciudad de Juliaca en el año 2019 se encontraron que los valores de coliformes termotolerantes y *Escherichia Coli* son de 91.951 NMP/100mL y 91.98 NMP/100 mL (Apaza, 2019).

Para poder abastecer una agua apta para consumo humano implica una serie de tratamientos unitarios, entre los cuales el más importante es la desinfección (Loaiza, 2018; Moscoso, 2003). El método más común, de bajo costo y fácil manejo es la cloración

(Mendoza et al., 2019), sin embargo este método de desinfección no es fácil de proveer a los lugares alejados, además que muchos de los habitantes no aceptan el sabor del cloro en el agua y asocian con enfermedades diarreicas, además no hierben el agua porque creen que se pierde el sabor (Carhuapoma, 2019; Feria et al., 2020). Frente a esta problemática la desinfección mediante radiación solar resulta ser un método eficiente, económico y ambientalmente sostenible, según (Vivar & Fuentes, 2016) han demostrado una inactivación eficaz de virus, protozoos, hongos y helmintos. Este método es el más adecuado para las poblaciones de escasos recursos, que no tienen acceso a sistemas de cloración (Ortega, 2020).

El método de desinfección física por radiación solar hace uso de los rayos UV y de botellas de vidrio o de *Tereftalato de Polietileno* (PET) llenas de agua, para desinfectar el medio líquido gracias a la capacidad germicida de la radiación solar específicamente de la radiación UV-A, por otra parte los rayos infrarrojos contribuyen al incremento de la temperatura, llevando a condiciones adversas para los microorganismos presentes (Retamal, 2019; Ruíz, 2017). Para tener una mayor efectividad de desinfección se debe considerar el tiempo de exposición, la intensidad de la radiación solar, las condiciones climáticas y la turbidez del agua a tratar (Godoy et al., 2021)

El propósito de la presente investigación fue determinar la eficiencia de desinfección de agua para consumo humano mediante radiación solar en zonas altoandinas con altos índices de radiación, y comprobar su viabilidad mediante dos ensayos experimentales.

2. Materiales y métodos

2.1.Muestreo

Las muestras se recolectaron directamente de un pozo ubicado en la salida a Arequipa Km 6 de la comunidad Central Esquen de la ciudad de Juliaca en las coordenadas -15,513556 N y -70,173114 E, de acuerdo al “Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados, muestreo de aguas subterráneas” del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2016).

2.2.Ensayos Experimentales

El estudio constó de dos diferentes ensayos; el primer ensayo duró seis días y el segundo ensayo un día, donde se analizó la temperatura, turbidez y la inactivación de *Escherichia Coli*, bajo los estándares propuestos por el Decreto Supremo N° 031-2010-SA y la Norma técnica peruana (NTP 214.031.2001) (Castillo et al., 2016).

El **primer ensayo experimental** constó en exponer al sol cuatro tratamientos por triplicado durante seis días en horarios de 09:00 hasta 12:00 horas; 10:00 hasta 13:00 horas; 11:00 hasta 14:00 horas y de 12:00 hasta 15:00 horas durante los días 18/05; 19/05; 20/05; 26/05; 01/06; 02/06 del año 2021.

Modelo estadístico: Los resultados se sometieron al análisis estadístico basado en el Diseño en Bloque Completo al Azar (DBCA), donde se definieron como variables de respuesta la turbiedad y *E. Coli*, además se emplearon los supuestos de normalidad y homogeneidad de Kolmogórov-Smirnov, también se aplicó herramientas de la estadística descriptiva como el Análisis de Varianza (ANOVA) y los modelos estadísticos de Tukey y Duncan.

Las hipótesis planteadas fueron:

- H_0 : Existe diferencias de inactivación entre el tratamiento 3 los tratamientos 1, 2 y 4.
- H_a : No existe diferencias de inactivación entre el tratamiento 3 los tratamientos 1, 2 y 4.

El **segundo ensayo experimental** se aplicó seis tratamientos por triplicado (18 botellas), los cuales se expusieron al sol en simultáneo a partir de las 09:00 horas, analizándose tres botellas de un tratamiento al transcurso de 1 hora; 2 horas; 3 horas; hasta llegar a analizar el ultimo triplicado del tratamiento a las 15:00 horas del día 07 de junio del 2021 (Moreno et al., 2021; Samoili et al., 2021), posteriormente los resultados fueron contrastados con la cinética de desinfección de la ley de Chick – Watson, cuya ecuación se expresa de la siguiente forma.

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -K C t \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

N_0 : Concentración inicial de microorganismos

N : Concentración final de microorganismos después del tratamiento con la concentración del desinfectante C , después de un tiempo t

K : Susceptibilidad o coeficiente de letalidad del microorganismo

Para el caso de la cinética de Chick, los valores de la constante de letalidad (K) representan a la susceptibilidad a los rayos solares incidentes en las paredes microbianas, el cual está relacionado con la muerte de celular, también se puede explicar que a mayor valor de K el tiempo de inactivación bacteriana será menor y la pendiente que se dibuja será más inclinada.

Las unidades experimentales para los dos ensayos fueron botellas de vidrio de 2000 mL expuestas al sol sobre el soporte de base de aluminio (Huanca, 2017), para captar una

mejor radiación solar se acomodó la unidad experimental a una inclinación de 15° Norte (Bermudes, 2015; Castillo et al., 2016), la data de radiación fue obtenida de la estación meteorológica marca DAVIS modelo *Vantage Pro2* ubicada en el campus de la Universidad Peruana Unión de Juliaca, Perú (Lopez, 2016).

3. Resultados

3.1. Concentración de *Escherichia Coli* Inicial

Los valores de *E. Coli* obtenidos de las muestras presentaban cifras elevadas en contraste con los límites admitidos por la OMS y el DS 031-2010-SA; la concentración máxima se registró el día 07 de junio cuyo dato fue 310 UFC/100mL y el día 01 de junio se registró la menor concentración con un valor de 179 UFC/100mL, los valores evidenciados en la figura 1 demuestran que la calidad del agua muestreada no era apta para el consumo humano sin antes tratarlo.

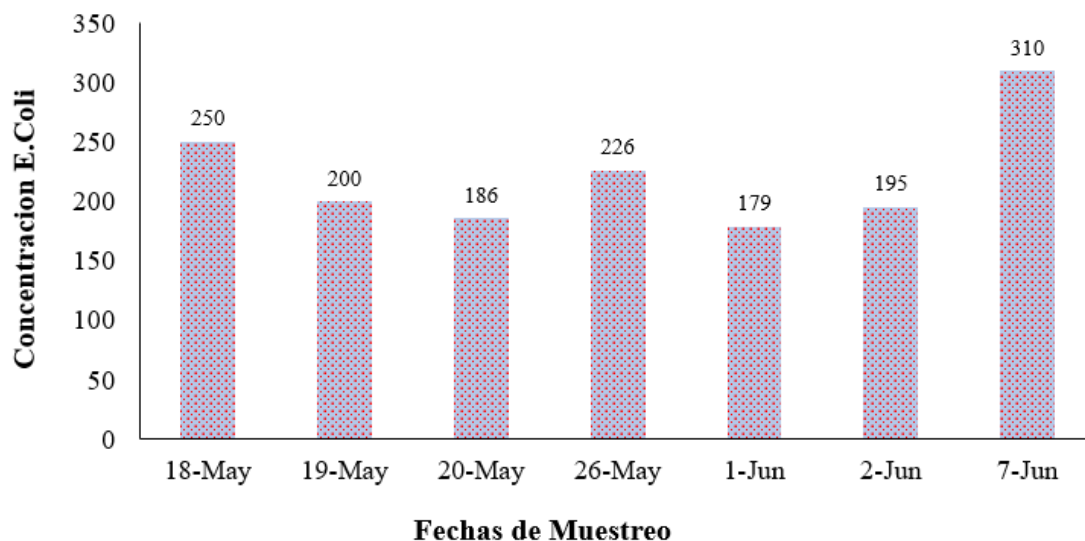


Figura 1. Variación de concentración respecto a los días experimentación.

3.2. Turbiedad

La turbiedad inicial registrada durante los 7 días de estudio se encontraba dentro de los límites máximos permisibles para agua de consumo humano del DS. 031-2010-SA, donde el valor mínimo de turbiedad de la muestra fue de 3.35 registrado en el sexto día y el valor máximo fue de 4.59 registrado el quinto día, en la figura 2 se muestra las turbiedades registradas.

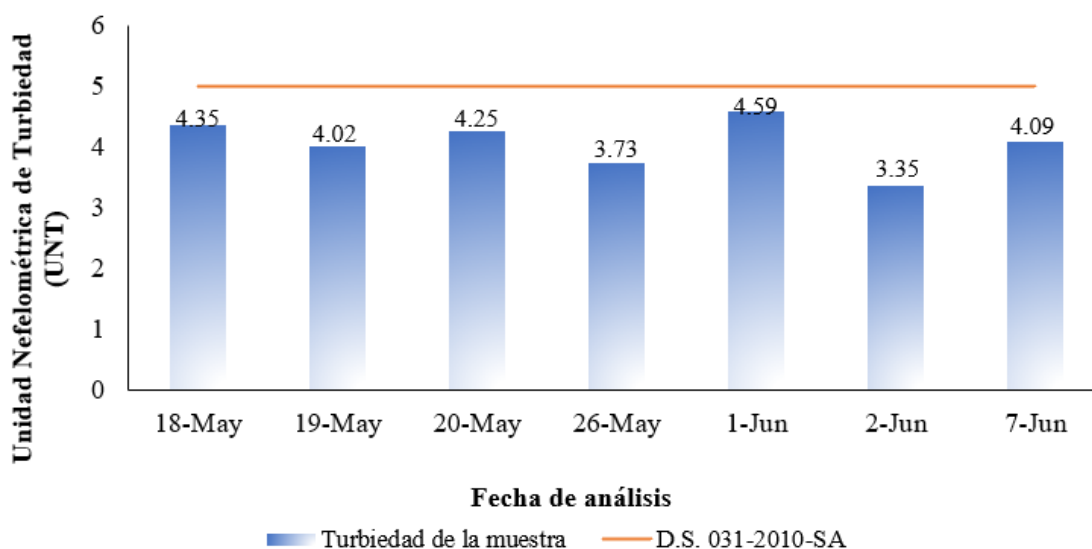


Figura 2. Valores de turbiedad de las muestras

3.3. Temperatura

Los datos de temperatura, se midieron antes de realizar los tratamientos y después de cada tratamiento, donde cada tratamiento registró distintos valores de temperatura con un margen de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ por replica, este parámetro se analizó ya que existe una sinergia entre la radiación UV-A, los rayos infrarrojos y la temperatura de la muestra.

En el **primer ensayo experimental** fue evaluado durante seis días a cada tres horas se pudo ver que la temperatura incrementaba en $26^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ de la condición inicial en cada

día de tratamiento, de esta fase la temperatura mínima registrada fue el día 01 de junio donde el valor era de 11.6°C y una temperatura máxima de 29.6°C el 05 de mayo.

El **segundo ensayo experimental** se analizó el día 07 de junio durante 6 horas y las temperaturas registradas fueron: Mínima 11.7°C y máxima 31.1°C.

3.4. Radiación solar

La radiación solar durante los días de prueba presentó diferentes comportamientos debido a los factores climatológicos, y esta variación se reflejó en la inactivación de *E. Coli* para el primer día de análisis los niveles de radiación han estado por debajo de los demás días, la intensidad de radiación registrada a las 09:00 horas fue mínima 113 Wm⁻² y máxima de 276 Wm⁻²; a las 15:00 horas la radiación mínima registrada fue de 468 Wm⁻² y la máxima de 967 Wm⁻², además el pico de energía solar incidente se da a las 12:00 horas, con valores promedio de 825 Wm⁻², en la figura 3 se muestra el comportamiento de la radiación e incidencia solar.

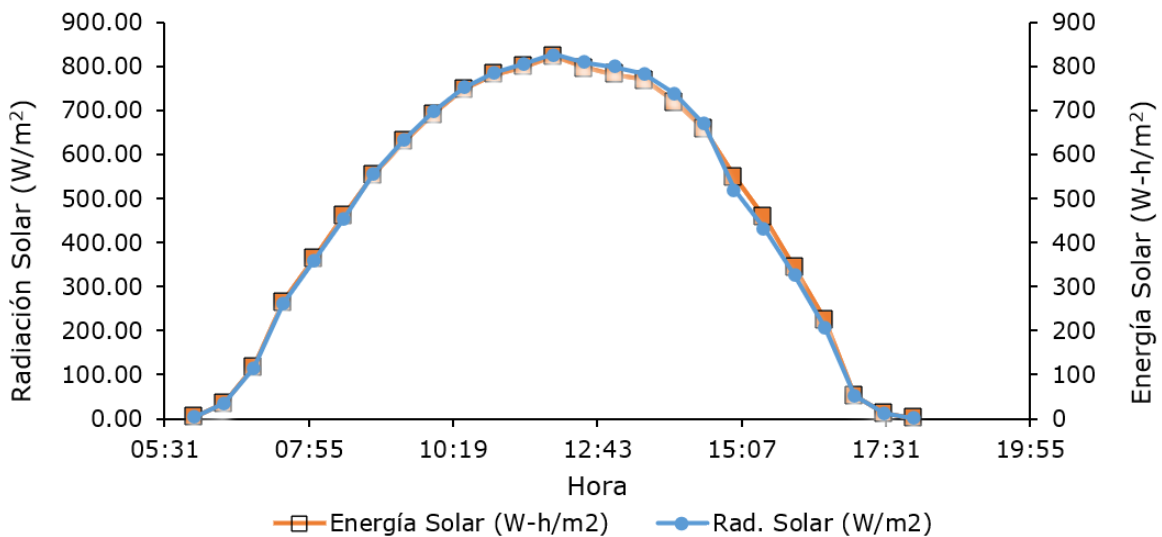


Figura 3. Comportamiento de la radiación e incidencia solar.

3.5. Ensayo experimental 1

De este proceso, los resultados a tres horas de exposición solar demostraron eficiencia de desinfección, con diferencias entre cada tratamiento; el día 1 presentó mayor concentración de *E. Coli* mismos que se reflejaron en las gráficas durante los cuatro tratamientos, el horario de mayor eficiencia en inactivación durante los días de estudio han sido a partir de las 11:00 hasta 14:00 horas, demostrando que existe muerte celular significativa; además, el día 3 la concentración de contaminante presentaba valores mínimos a comparación con los demás días, en la figura 4 se presenta la diferencia de inactivación en los diferentes tratamientos analizados.

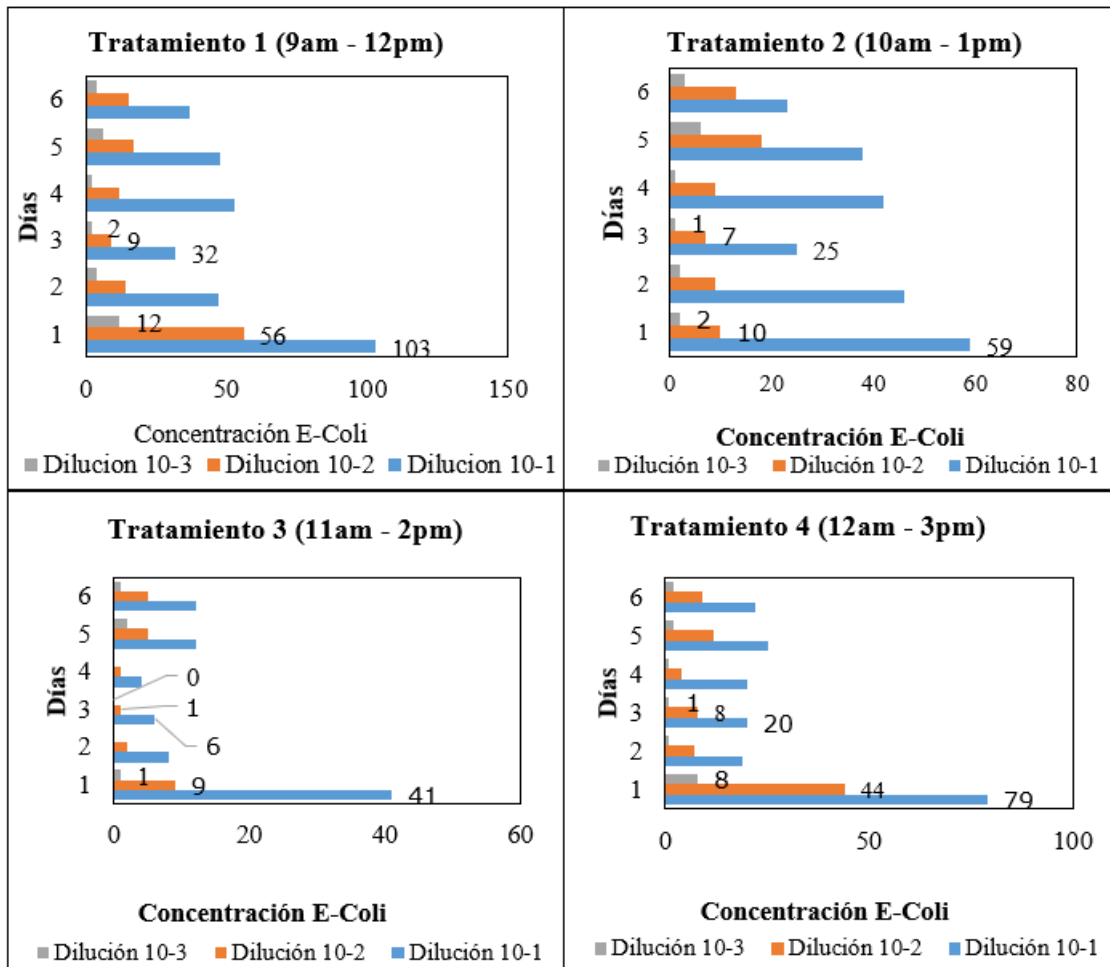


Figura 4. horarios de exposición en los diferentes días y resultados de inactivación.

Mediante un ajuste de regresión polinómica de segundo grado, el coeficiente R^2 pudo comprobar que la dilución 10^{-3} es el que mejor resultados puede dar al momento de hacer un estudio de inactivación de contaminantes, ya que su resultado es 0.9994 muy próximo a 1 lo que corrobora que la relación es fuertemente positiva, además la curva polinómica muestra que en el tratamiento 3 existe mejor eficiencia en inactivación para las tres diluciones de *E. Coli* con una radiación solar promedio de 794 Wm^{-2} , así como se muestra en la figura 5.

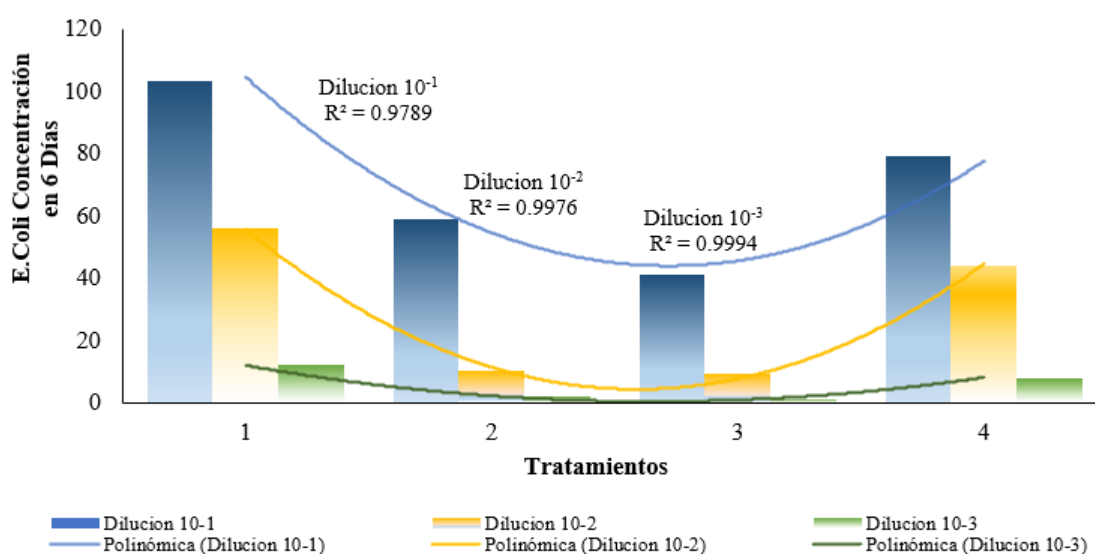


Figura 5. Ajuste polinómico a las diluciones

Finalmente, para el primer ensayo experimental los resultados se comprobaron por el método estadístico de Duncan y Tukey a un 95% de confiabilidad, donde se demostró que el tratamiento 3 que comprende desde las 11:00 hasta 14:00 horas es el que mejor representa la inactivación bacteriana en tres horas de exposición solar, además en las figuras 4 y 5 muestran que la eficiencia en este horario, en la tabla 1 se puede observar que Duncan está de acuerdo con Tukey en que el horario de mayor eficiencia es el que presenta el tratamiento 3.

Tabla 1.

Análisis estadístico de los horarios de desinfección (Tukey y Duncan)

Tratamientos	N	Dilución 10 ⁻¹			Dilución 10 ⁻²		Dilución 10 ⁻³		
		Subconjunto			Subconjunto		Subconjunto		
		1	2	3	1	2	1	2	
HSD	T1 (9-12)	6		53.33		20.50		5.00	
Tuke y^{a,b}	T2 (10-13)	6	38.83	38.83	14.00	14.00	2.50	2.50	
	T3 (11-14)	6	13.83		3.83		0.67		
	T4 (12-15)	6		30.83	11.00	11.00	2.50	2.50	
	Sig.		1.00	0.46	0.06	0.24	0.29	0.4	0.16
Dunc an^{a,b}	T1 (9-12)	6		53.33		20.50		5.00	
	T2 (10-13)	6	38.83		14.00	14.00	2.50	2.50	
	T3 (11-14)	6	13.83		3.83		0.67		
	T4 (12-15)	6		30.83	11.00	11.00	2.50	2.50	
	Sig.		1.00	0.15	1.00	0.08	0.10	0.14	0.05

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

El término de error es la media cuadrática (Error) = 10⁻¹ = 84.142; 10⁻² = 80.167; 10⁻³ = 3.833.

- Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6.000.
- Alfa = 0.05.

3.6. Ensayo experimental 2

Este ensayo fue evaluado desde las 09:00 horas donde la acción desinfectante de los rayos solares empezó la inactivación desde una concentración inicial de *E. Coli* de 198 UFC/100mL, al transcurso de 3 horas se podía comprobar que se eliminó el 90.1% de la concentración inicial, en cuanto a la dilución 10^{-3} la efectividad era al 93.4%, hasta las 15:00 horas la inactivación era al 100%, en la tabla 2 se puede observar la acción de los rayos solares respecto a la inactivación bacteriana.

Tabla 2.

Concentración de E-Coli para tratamiento 2 después de tratamiento con radiación

Hora	tiempo de exposición (H)	Temp. °C	Dilución			% de inactivación de <i>E. Coli</i>		
			10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
08:30	0	11.7	198	95	15	0	0	0
09:00 a 10:00	1	18.0	67	13	3	66.16	86.32	80.00
09:00 a 11:00	2	23.6	36	9	2	81.82	90.53	86.67
09:00 a 12:00	3	27.5	18	6	1	90.91	93.68	93.33
09:00 a 13:00	4	29.8	5	2	0	97.47	97.89	100.00
09:00 a 14:00	5	30.2	1	0	0	99.49	100.00	100.00
09:00 a 15:00	6	29.3	0	0	0	100.00	100.00	100.00

solar.

El efecto de inactivación bacteriana queda reflejado experimentalmente en los resultados obtenidos, ya que la destrucción bacteriana a una temperatura constante refleja una inactivación de primer orden en cuanto a las diluciones siendo una función exponencial, es decir que mientras más tiempo de exposición de los tratamientos existe un descenso exponencial de *E. Coli* registrado inicialmente, además esta destrucción o inactivación bacteriana es irreversible. Por otro lado, el índice de correlación lineal R^2 es 0.957, 0.9272 y 0.8697 valores próximos a 1 que indican que la correlación es fuertemente positiva, también los valores de coeficiente cinético (K) presentan pendientes de 0.4509 h^{-1} , 0.4751 h^{-1} y 0.8697 h^{-1} correspondientes a las diluciones 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} .

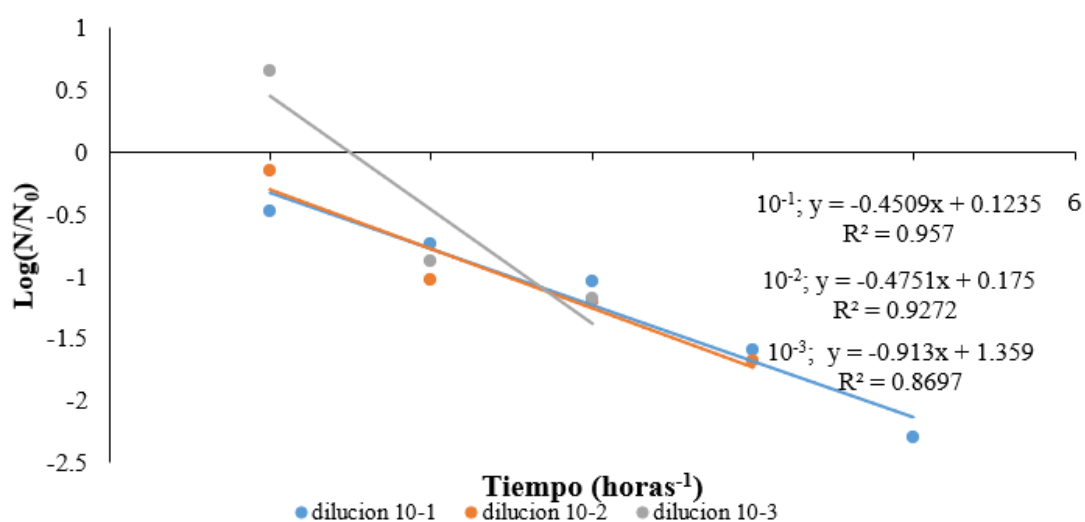


Figura 6. Cinética de Chick respecto al tiempo

4. Discusiones

La alta carga de contaminación de *E. Coli* encontrados en el agua analizada según Rock y Rivera (2014), se debe a que la fuente que ha estado en contacto directo o indirecto con las heces o estiércol de ganado que se usa para abonar la tierra, en caso de que estos residuos hayan estado en la superficie la acción de la lluvia terminó lavándola e

infiltrando en la fuente subterránea, y contrastando con lo que mencionan los investigadores la ubicación de la fuente de agua se encuentra cerca de un área de cultivo y a hogares que hacen uso de fosas sépticas artesanales.

La turbiedad para poder tratar aguas para consumo humano mediante el método de radiación solar según Meierhofer et al. (2005), se debe considerar aguas con valores menores a 10 UNT, y en contraste con Ivomne et al. (2013), para tratar el agua mediante el método de radiación solar estos valores deben estar dentro de los Límites Máximos Permisibles (5 UNT), ya que una turbiedad superior ayuda a la adhesión de metales pesados y compuestos orgánicos nocivos para la salud y dificulta la eficiencia de la desinfección, según los datos obtenidos el agua cumple con los requisitos de los dos autores para aplicar el método, además para situaciones en donde se cuente con aguas turbias se recomienda filtrar el agua o dejar en reposo para que se sedimente hasta que se obtenga un agua clara.

La radiación solar y la temperatura cumplen un rol importante en la desinfección del agua, de acuerdo a los resultados obtenidos se pudo contrastar que la mayor radiación e incidencia de energía solar se da las 12:00, y de acuerdo con Claire Oviedo (2006), las horas de mayor radiación solar se dan a partir de las 10:00 horas y el pico de radiación es entre las 11:30 y 12:30 horas, en comparación con Huanca (2017), los valores de irradiación solar máximo horario registrados por la estación meteorológica Puno del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), para la ciudad de Juliaca en los meses de mayo y junio del año 2013-2014 se registraron valores de 825Wm^{-2} y 838.17Wm^{-2} - 834.29Wm^{-2} y 809.85Wm^{-2} correspondientemente; además, los datos de radiación solar obtenidos por Vigo (2020), en una estación meteorológica próxima a la comunidad Central Esquen la radiación solar máxima registrada a las 12:00 horas era de 1057Wm^2 . Según Rossel et al.(2020), “la radiación UV penetra la pared celular de los

organismos y es absorbida por el ADN y el ARN dimerizando dos bases (las une entre sí con un doble enlace), lo cual impide la reproducción o produce la muerte celular, la dimerización de dos timinas es eficiente para inactivar microorganismos”.

En cuanto a los resultados obtenidos, el primer ensayo experimental aporta en opciones de elección de horarios de exposición de los tratamientos en caso de que el usuario del método olvide exponer su agua en horarios recomendados y en comparación con Ivonne et al.(2013), la eficiencia de desafección se ve mejor a las tres horas, y mediante el presente estudio realizado para condiciones altoandinas se pudo identificar el horario de mayor eficiencia, los cuales quedan representados por el tercer tratamiento, sin embargo aunque este tratamiento no presenta una descontaminación total pero se puede tomar como un punto de partida horarios antes de las 11:00 horas a fin de aprovechar la eficiencia de los rayos UV-A.

El segundo ensayo experimental demostró que las seis horas de exposición de los tratamientos son necesarios para inactivar la *E. Coli*, lo cual se corrobora con los resultados de la guía de aplicación para desinfección solar de agua de Meierhofer et al.(2005), donde aplicaron el mismo método y los resultados fueron similares, por ello se deduce que este método es el más efectivo para purificar el agua y hacerla apta para consumo humano en poblaciones donde no se cuenta con un sistema de tratamiento de aguas para consumo humano, además en los últimos 15 años, diversos investigadores hicieron estudios experimentales en condiciones simuladas y naturales del método y demostraron que la radiación solar inactiva significativamente los microorganismos presentes en el agua (Fontán, 2011), en comparación con Tibaduiza y Tibaduiza (2014) encontraron una constante cinética de 0.7066 h^{-1} el cual está influenciado con los índices de radiación solar.

El método de desinfección mediante radiación solar aplicado en condiciones altoandinas resulta ser favorable para tratar aguas para consumo humano, además aporta a las metas propuestas planteadas en la asamblea general de las Naciones Unidas, ya que es un método de fácil aplicación, bajo coste, ambientalmente sostenible y en países en vías de desarrollo reduce la pobreza, mejora la calidad de vida de la población y apunta a un desarrollo sostenible reduciendo la tasa de morbilidad en niños menores de 5 años.

5. Conclusiones

De acuerdo a la investigación realizada se concluye que el efecto germicida de los rayos UV-A en condiciones altoandinas son eficientes para inactivar la presencia de *E. Coli* en aguas sin tratamiento destinada al consumo humano, ya que los resultados para la primera fase experimental mostraron tasas de inactivación aceptables dando resultados de efectividad al 95% en un tiempo de exposición de tres horas que inician desde las 11:00 hasta las 14:00 horas, para lograr la efectividad absoluta de inactivación mediante el método de radiación solar, es mejor exponer más tiempo y eso queda comprobado que a mayor tiempo de exposición los resultados son mejores, en la segunda fase de la investigación donde el tiempo de exposición se prolonga a seis horas que inicia desde las 09:00 hasta las 15:00 horas donde los rayos UV penetran la pared celular dimerizando dos bases logrando la inactivación bacteriana, la eficiencia de la radiación se empiezan a notar al transcurso de las 2 horas y al transcurso de las seis horas se puede ver que la desinfección del agua llega al 100%, en caso de que se inicie el tratamiento horas después de las 09:00 horas, se recomienda tener en cuenta el factor climático, turbiedad, volumen del agua a tratar, tiempo de exposición y realizarlo hasta antes de las 11:00 horas ya que esas son las horas donde la radiación solar va en aumento y aun así se pueden obtener resultados óptimos.

El tratamiento de agua para consumo humano mediante radiación solar mejorará la calidad de vida de muchos hogares que no cuentan con agua potable, además reducirá la tasa de mortandad y enfermedades en niños menores de 5 años lo cual representa un ahorro de gastos medicinales en muchas familias, del mismo modo con el uso de este método se busca garantizar una vida sana, una gestión responsable del agua y aportar con los objetivos de desarrollo sostenible propuestas por la ONU a fin de mejorar la calidad de vida de los pobladores en países en vías de desarrollo.

Referencias

- Apaza, T. L. (2019). *Evaluación de arsénico, dureza, coliformes termotolerantes y E. coli en aguas subterráneas, de las urbanizaciones de Santa Adriana y Niño San Salvador, del distrito de Juliaca, Puno 2019*. 1–94.
- Ballesteros, M., Brown, E., Jouravlev, A., Küffner, U., & Zegarra, E. (2005). Administración del agua en América Latina: situación actual y perspectivas. In *CEPAL-SERIE Recursos naturales e infraestructura* (Issue Recursos Naturales e Infraestructura).
- Bermudes, D. M. (2015). Desinfección solar para abastecimiento de agua de consumo humano a nivel domiciliario en el sector de la pereira, parroquia La Avanzada, Cantón Santa Rosa, Provincia de el Oro. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 53(9), 9–16.
- Carhuapoma, C. Y. E. (2019). Diseño del servicio de agua potable en el caserío carrizo de la zona de Malingas del distrito de Tambogrande, provincia de Piura, departamento de Piura-Mayo 2019. In *Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote*.
- CASMA, J. C. (2015). *Brasil, Colombia y Perú, entre los que más agua tienen en el mundo* / *Internacional* / *EL PAÍS*. https://elpais.com/internacional/2015/03/04/actualidad/1425491803_078422.html
- Castillo, J., Franco, V., & Cruz, M. (2016). Evaluación del método “SODIS” en la desinfección del agua para uso doméstico en la comunidad de Yanacoto, distrito de Lurigancho-Chosica. *Revista de Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 2(2), 17–30.
- Claire Oviedo, M. A. (2006). *Validación del Método SODIS como alternativa para la Desinfección del Agua en la Ciudad de Catacamas, Departamento de Olancho*. 81.
- Feria, J., Álvarez, R., & Rodríguez, J. (2020). Desinfección de agua cruda con radiación solar (SODIS) para la remoción de coliformes totales. *Revistas Espacios*, 41(38), 82–90.
- Fontán, S. M. (2011). *Cryptosporidium en la Desinfección Solar del Agua de Bebida. Universidad Santiago de Compostela, España, 202*.
- Godoy, P. S. C., González, G. J. C., León, C. J. G., & Castillo, H. E. D. (2021). Evaluación de la capacidad de reacción de coliformes de aguas residuales a la fotocátalisis con

técnicas de recubrimiento por inmersión. *AlfaPublicaciones*, 3(3.1), 343–360.
<https://doi.org/10.33262/ap.v3i3.1.102>

Gómez, D. O. G. (2014). Enfermedad diarreica aguda por *Escherichia coli* Enteropatógenas en Colombia. *Revista Chilena de Infectología*, 31(5), 577–586.
<https://doi.org/10.4067/S0716-10182014000500010>

Huanca, E. (2017). Caracterización de los recursos eólico y solar de la ciudad de Juliaca. *Universidad Nacional Del Altiplano*, 105.

INEI, Villacorta Olazábal, M., & Atanacio Misari, J. (2010). *Perú: Mapa del Déficit de Agua y Saneamiento Básico a Nivel Distrital, 2007*. 193.

Ivomne, G., Rafael, F. D. S., & Vincenzo, S. (2013). Evaluación del método “SODIS” en la desinfección del agua para abastecimiento en La Guadalupe, Chirgua, municipio Bejuma del estado Carabobo. *Revista INGENIERÍA UC*, 20(2), 29–38.

Loaiza, S. J. C. (2018). Diagnóstico Del Sistema Operativo De La Planta De Tratamiento De Agua Potable (Ptap) Guacavia En El Municipio De Cumaral, Departamento Del Meta. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 77.

Lopez, G. D. (2016). *Determinación De Bacterias Escherichia Coli Y Salmonella Típhi Mediante Membrana Filtrante Como Causales De Enfermedades Hídricas*. 1–27.

Meierhofer, R., Wegelin, M., Torres, X. del R., Gremion, B., Mercado, A., Mausezahl, D., Hobbins, M., Echeverría, S. I., Grimm, B., & Aristanti, C. (2005). *Desinfección Solar del Agua*.

Mejía, A., Castillo, O., & Vera, R. (2016). Agua potable y saneamiento en la nueva ruralidad de América Latina. In *Agua para el desarrollo*.

Mendoza, Á. L. C., Vidal, L. R. L., Hurtado, E. A., Barrios, R., & Silva, R. (2019). *Sistema de tratamiento de aguas superficiales para consumo humano en la microcuenca del Río Carrizal, Ecuador*.

MINAM. (2016). *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados, muestreo de aguas subterráneas*. Setiembre, 22.

Moreno, J., Giannakis, S., Samoili, S., Farinelli, G., McGuian, K., Pulgarín, C., & Marugán, J. (2021). *SODIS potential : A novel parameter to assess the suitability of solar water disinfection worldwide*. 419(March). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129889>

Moscoso, C. C. (2003). *Métodos tradicionales para purificar el agua*.

ONU, O. de las N. U. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. *Asamblea General, 15900*, 40.

Ortega, M. (2020). *SODIS: El método más barato y eficaz para desinfectar el agua / Cubadebate*. <http://www.cubadebate.cu/especiales/2020/01/18/sodis-el-metodo-mas-barato-y-eficaz-para-desinfectar-el-agua/>

Retamal, R. V. R. (2019). Impacto de la radiación solar en sistema captador y reflector para aguas residuales tratadas. In *Sistema de bibliotecas*. Universidad del Bío-Bío.

Rock, C., & Rivera, B. (2014). *¿Qué es La Calidad del Agua?*

Rossel, B. L. J., Rossel, B. L. A., Ferro, M. F. P., Ferro, G. A. L., & Zapana, Q. R. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), 68–77. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>

Ruíz, D. (2017). *Incidencia de consideraciones de diseño en cámaras de radiación solar para la eliminación de coliformes*. 58.

Samoili, S., Farinelli, G., Moreno, J. Á., McGuigan, K. G., Marugán, J., Pulgarín, C., & Giannakis, S. (2021). Predicting the bactericidal efficacy of solar disinfection (SODIS): from kinetic modeling of in vitro tests towards the in silico forecast of E . coli inactivation e Angel. *ScienceDirect Chemical*, 427(February 2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130866>

SILVA, Y. L. S. (2019). *Universidad Nacional Del Altiplano Escuela De Posgrado Doctorado En Ciencia*. 3–5.

Tibaduiza, C., & Tibaduiza, L. (2014). Depuración de aguas contaminadas por Escherichia coli y Salmonella mediante radiación solar. *Facultad de Ingeniería*,

Universidad Libre, Bogotá, 67.

UNESCO. (2019). United Nations World Water Development Report. In *The Sage Learning of Liu Zhi* (Vol. 1).

Vigo, J. E. (2020). *Efecto de Microorganismos Eficaces (ME) en el proceso de depuración de aguas residuales domésticas en condiciones altoandinas.* UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN.

Vivar, M., & Fuentes, M. (2016). Using solar disinfected water: On the bacterial regrowth over 1-week of water usage including direct intake after sun exposure and long-term dark storage. *Solar Energy*, *131*, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.044>