

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON  
TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE  
AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA  
DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE  
CHACHAPOYAS, AMAZONAS.**

**Autor: Bach. Wildor Gosgot Angeles**

**Asesores: Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres**

**Ph.D. Danilo Edson Bustamante Mostajo**

**Registro:.....**

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER  
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON  
TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE  
AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA  
DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE  
CHACHAPOYAS, AMAZONAS.**

**Autor: Bach. Wildor Gosgot Angeles**

**Asesores: Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres**

**Ph.D. Danilo Edson Bustamante Mostajo**

Registro:.....

**CHACHAPOYAS – PERÚ**

**2018**

## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

Wildor Gosgot Valle y Tulita Angeles Rojas por brindarme su apoyo, amor incondicional, formarme en un hogar con valores y principios, enseñarme a luchar por los sueños y por ser los mejores padres del mundo. A pesar de tu partida, Madre, me sigues dando lecciones de vida.

### **A MIS HERMANOS**

Ronald, Robinson y Henry por ser cómplices de mis travesuras de niño, soporte en todos los momentos de mi vida y ser los mejores hermanos.

Mery Tafur y Karina Daza, mis cuñadas, por sus consejos y apoyo para seguir adelante.

### **A MIS ABUELOS**

Adelayda Rojas Alegria, por engreírme y compartir los episodios más felices de mi niñez, que ahora me acompaña desde el Cielo en todo momento de mi vida.

José Sandalio, por compartir sus historias, aventuras y ser un ejemplo de superación.

Fernando Gosgot por brindarme su cariño y consejos para seguir el camino del bien.

### **A MIS FAMILIARES**

Mary Tafur, Wilmer Garamendi, Lucy Tafur, Enrique Ugaz y Jaqueline Tafur por abrirme las puertas de su hogar y darme su apoyo incondicional para seguir estudiando.

Nancy Capto, Luis Trauco, mis tíos, Luis Alberto, Nancy, Jhordany y José Carlos, mis primos, por ayudarme y motivarme para concretar esta meta.

Fabricio Gosgot Tafur, un angelito de Dios, que me bendice e ilumina desde lo más alto en todos mis días.

*Wildor Gosgot Angeles*

## AGRADECIMIENTO

Al Ph.D. Danilo Bustamante Mostajo, por su apoyo, paciencia y compartir sus conocimientos para concretizar la presente investigación.

Al Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres, por el apoyo incondicional, paciencia y consejos durante el transcurso de mi formación profesional y la ejecución de la presente Tesis.

Al Dr. Ing. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, por sus aportes y recomendaciones para mejorar la presente investigación.

Al M.Sc. Lenin Quiñones Huatangari, por su apoyo en el diseño y modelización del colector compuesto parabólico.

Al M.Sc. Ing. Eli Pariente Mondragón, por brindarme su apoyo y resolver mis inquietudes como profesional en formación.

Al Dr. Franz Zirena Vilca, por compartir su conocimiento y experiencia en la investigación científica y a su vez facilitarme las herramientas en búsqueda de información para realizar el presente estudio.

Al Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES CES) por brindarme las facilidades para realizar los análisis de las muestras del presente estudio en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas y el Área de Geomática por brindar los datos meteorológicos.

A todas las personas, compañeros y docentes, que me ha aportado de diferentes maneras en el desarrollo de la investigación y mi formación profesional.

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

**Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI  
RECTOR**

**Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN  
VICERRECTOR ACADÉMICO**

**Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN  
VICERRECTORA DE INVESTIGACIÓN**

**Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES  
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

## **VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS**

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **“EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS”**, del tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental :

**Bach. WILDOR GOSGOT ANGELES**

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones.

Chachapoyas, 13 de Diciembre del 2018

---

**Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES**

**Asesor**

## **VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS**

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **“EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS”**, del tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental :

**Bach. WILDOR GOSGOT ANGELES**

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones.

Chachapoyas, 13 de Diciembre del 2018

---

**Ph.D. DANILO EDSON BUSTAMANTE MOSTAJO**

**Asesor**



**ANEXO 3-N**

**ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL**

En la ciudad de Chachapoyas, el día 17 de DICIEMBRE del año 2018, siendo las 11:30 horas, el aspirante WILDOR GOSGOT ÁNGELES defiende en sesión pública la Tesis titulada: EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS.

para obtener el Título Profesional de INGENIERO AMBIENTAL a ser otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado Evaluador, constituido por:

Presidente : Dr. MIGUEL ANGEL BARRENA GURBILLÓN

Secretario : Dra. CÁSTULA ALVARADO CHUQUI

Vocal : M.Sc. JARIS EMMANUEL VENEROS GUEVARA

Procedió el aspirante a hacer la exposición de la Introducción, Material y método, Resultados, Discusión y Conclusiones, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la Tesis presentada, los miembros del Jurado Evaluador pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones y objeciones consideraron oportunas, las cuales fueron contestadas por el aspirante.

Tras la intervención de los miembros del Jurado Evaluador y las oportunas respuestas del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el Jurado Evaluador determinó la calificación global concedida la Tesis para obtener el Título Profesional, en términos de:

Aprobado (  )      Desaprobado (  )

Otorgada la calificación, el Secretario del Jurado Evaluador lee la presente Acta en sesión pública. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las 13:00 horas del mismo día y fecha, el Jurado Evaluador concluye el acto de sustentación de la Tesis para obtener el Título Profesional.

SECRETARIO

VOCAL

PRESIDENTE

OBSERVACIONES: .....



**JURADO EVALUADOR**

---

**Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN**

**Presidente**

---

**Dra. CÁSTULA ALVARADO CHUQUI**

**Secretaria**

---

**M.Sc. JARIS EMMANUEL VENEROS GUEVARA**

**Vocal**

## **DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO**

Yo, Wildor Gosgot Angeles, identificado con DNI N° 70153443, Egresado de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

### **DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:**

1. Soy autor de la Tesis titulada : **“EFICIENCIA DEL CATALIZADOR DE CONCRETO CON TiO<sub>2</sub> EN FOTORREACTOR PARA DESINFECCIÓN DE AGUA Y DEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA DEL AGUA RESIDUAL DE LA CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS”**, que presento para obtener el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**.
2. La Tesis no sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La Tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La Tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. La información presentada es real y no ha sido falsificada, ni duplicada, ni copiada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la Tesis para obtener el Título Profesional, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para la UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado a las que encontraren causa en el contenido de la Tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente, asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

13 de diciembre de 2018

---

Wildor Gosgot Angeles

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS .....	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS .....	iv
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS .....	v
JURADO EVALUADOR.....	vi
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
I. INTRODUCCIÓN .....	16
II. MATERIAL Y MÉTODOS .....	23
2.1. Muestras de agua .....	23
2.2. Colector parabólico compuesto .....	23
2.3. Catalizador de concreto impregnado de dióxido de titanio .....	27
2.4. Instalación del sistema de tratamiento fotocatalítico .....	31
2.6. Tratamientos .....	33
2.5. Evaluación experimental.....	34
2.7. Medición de la radiación solar .....	35
2.8. Medición de la temperatura .....	35
2.9. Análisis de los parámetros microbiológico y materia orgánica.....	36
2.10. Cálculo de eficiencia.....	36

III. RESULTADOS .....	37
3.1. Desinfección del agua de pozo .....	37
3.1.1. Caracterización inicial del agua de pozo .....	37
3.1.2. Radiación solar y temperatura .....	37
3.1.3. Inactivación de Coliformes totales .....	40
3.1.4. Inactivación de Coliformes fecales .....	41
3.1.5. Inactivación de <i>E. coli</i> .....	41
3.2. Degradación de materia orgánica de agua residual .....	45
3.2.1. Caracterización del agua residual .....	45
3.2.2. Radiación y temperatura .....	45
3.2.3. pH.....	48
3.2.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).....	48
3.2.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....	49
IV. DISCUSIÓN.....	51
V. CONCLUSIONES .....	55
VI. RECOMENDACIONES .....	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57
ANEXOS .....	61
Anexo1: Radiación solar en los días evaluados.....	61
Anexo 2: Temperaturas medidas durante los experimentos .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de diseño del CPC 1.15 X.....	26
<b>Tabla 2.</b> Propiedades del catalizador de concreto impregnado con TiO <sub>2</sub> .....	31
<b>Tabla 3 .</b> Relaciones trigonométricas de un triángulo rectángulo 30 y 60 grados .....	32
<b>Tabla 4.</b> Parámetros de calidad del agua de pozo en la fuente. ....	37
<b>Tabla 5.</b> Resultados de inactivación de coliformes totales según los tratamientos y los días evaluados y sus parámetros evaluados. ....	43
<b>Tabla 6.</b> Resultados de inactivación de coliformes fecales según los tratamientos y los días evaluados, así, como los parámetros medidos.....	43
<b>Tabla 7.</b> Resultados de inactivación de coliformes fecales según los tratamientos y los días evaluados, así, como los parámetros medidos.....	44
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de materia orgánica del agua residual de la quebrada Santa Lucía .....	45
<b>Tabla 9.</b> Eficiencia de reducción de DBO por los tratamientos aplicados según los días de evaluación .....	50
<b>Tabla 10.</b> Eficiencia de reducción de DBO por los tratamientos aplicados según los días de evaluación .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Virus, bacterias y parásitos responsables de enfermedades causadas por el agua debido a la falta de instalaciones de saneamiento, malas prácticas de higiene y la ingesta de agua contaminada con heces.....	17
<b>Figura 2.</b> Descripción gráfica de la técnica de tratamiento de agua de desinfección solar (SODIS)..	18
<b>Figura 3.</b> Distribución de usuarios regulares de SODIS en el mundo..	19
<b>Figura 4.</b> Mecanismo de un proceso de fotocátalisis heterogéneo. .	20
<b>Figura 5.</b> Proceso de fotocátalisis del $TiO_2$ .....	20
<b>Figura 6.</b> Ubicación de la toma de muestra de agua .....	23
<b>Figura 7.</b> Perfil del colector parabólico compuesto (CPC).....	24
<b>Figura 8.</b> Geometría de un colector parabólico compuesto (CPC).....	24
<b>Figura 9.</b> Perfil del CPC 1.15 X en el plano (x , y). .....	26
<b>Figura 10.</b> Colector parabólico compuesto 1.15 X.....	27
<b>Figura 11.</b> Diseño del catalizador .....	28
<b>Figura 12.</b> Molde del catalizador cilíndrico.....	28
<b>Figura 13.</b> Materiales para la elaboración de los catalizadores .....	29
<b>Figura 14.</b> Impregnación de $TiO_2$ en concreto.....	30
<b>Figura 15.</b> Influencia de la rotación de la tierra sobre la radiación solar.....	31
<b>Figura 16.</b> Trayectoria del sol según el periodo del año.....	31
<b>Figura 17.</b> Medidas del soporte del CPC 1.15 X. ....	32
<b>Figura 18.</b> Instalación de los CPC 1.15 X sobre el soporte .....	33

<b>Figura 19.</b> Experimento de desinfección de agua de pozo con los tratamientos: T0 (SODIS-CPC), T1 (TiO <sub>2</sub> susp. – CPC), T2 (CI-CPC) y T3 (CII-CPC). .....	34
<b>Figura 20.</b> Experimento de degradación de materia orgánica de agua residual con los tratamientos: T0 (SODIS-CPC), T1 (TiO <sub>2</sub> susp. – CPC), T2 (CI-CPC) y T3 (CII-CPC)..	35
<b>Figura 21.</b> Radiación solar de los días evaluados en la desinfección de agua de pozo .	37
<b>Figura 22.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamiento, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 9/09/2018 .....	38
<b>Figura 23.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 12/09/2018. ....	38
<b>Figura 24.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 16/09/2018. ....	39
<b>Figura 25.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 19/09/2018. ....	39
<b>Figura 26.</b> Variación del pH del agua según el tratamiento en los días evaluados.....	40
<b>Figura 27.</b> Inactivación de coliformes totales según los tratamientos durante los días de evaluación .....	40
<b>Figura 28.</b> Inactivación de coliformes fecales según tratamiento en los días evaluados. ....	41
<b>Figura 29.</b> Inactivación de <i>E. coli</i> según los tratamientos aplicados y los días evaluados .....	42
<b>Figura 30.</b> Variación de la radiación solar en los días evaluados para tratamientos de degradación de materia orgánica de agua residual .....	45
<b>Figura 31.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 23/09/2018. ....	46
<b>Figura 32.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 30/09/2018. ....	46

<b>Figura 33.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 07/10/2018 .....	47
<b>Figura 34.</b> Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante experimento del 12/10/2018 .....	47
<b>Figura 35.</b> Variación de pH de los tratamientos en días evaluados .....	48
<b>Figura 36.</b> Demanda Biológica de Oxígeno después de la aplicación de los tratamientos en los días evaluados.....	48
<b>Figura 37.</b> Reducción de la DQO después los tratamientos aplicados en los días evaluados .....	49

## RESUMEN

El acceso al agua potable, así como, el tratamiento de las aguas residuales en la zona urbana y rural son los desafíos más urgentes en la actualidad, y las tecnologías impulsadas por la energía solar para el tratamiento de agua son alternativas para garantizar el suministro eficiente de estos servicios. En este contexto, se investigó la eficiencia de desinfección de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual de tratamientos por desinfección solar (SODIS-CPC) y fotocátalisis ( $\text{TiO}_2$  en suspensión [ $\text{TiO}_{2\text{susp.}}$  - CPC], catalizador de concreto mezclado con  $\text{TiO}_2$  [CI-CPC] y catalizador de concreto impregnado con  $\text{TiO}_2$  [CII-CPC]) acoplado a un colector parabólico compuesto 1.15 X (CPC 1.15X) y fotorreactor de botella PET de 1,5 L. Las evaluaciones se realizaron en septiembre y octubre entre las 8:00 y 16 horas, con radiación solar menor a los  $1000 \text{ W/m}^2$ . Los resultados demuestran que el CII-CPC ha logrado tener una eficiencia máxima de 99,99 % de inactivación de coliformes totales, fecales y *E. coli* en el agua de pozo. El SODIS-CPC ha tenido una eficiencia máxima de remoción de DBO y DQO de 93,08 y 94,94 %, respectivamente. La eficiencia de desinfección y degradación depende de la intensidad de la radiación incidente, el tiempo de exposición, concentración de  $\text{TiO}_2$  y la geometría del fotorreactor.

**Palabras claves:** Energía solar, tratamiento de agua, fotocátalisis, SODIS, *E. Coli*, fotorreactor, catalizador, Amazonas, desinfección.

## ABSTRACT

Access to drinking water as well as the treatment of wastewater in the urban and rural areas are the most urgent challenges at present, and technologies use solar energy for water treatment are alternatives to guarantee efficient supply of these services. In this context, the efficiency of disinfection of well water and degradation of organic matter from wastewater from treatments by solar disinfection (SODIS-CPC) and photocatalysis (TiO<sub>2</sub> in suspension [TiO<sub>2</sub><sub>susp.</sub> - CPC], concrete catalyst mixed with TiO<sub>2</sub> [CI-CPC] and concrete catalyst impregnated with TiO<sub>2</sub> [CII-CPC]) coupled to a composite parabolic collector 1.15 X (CPC 1.15X) and a 1,5 L PET bottle photoreactor. The evaluations were carried out in September and October between 8:00 and 16:00 hours, with solar radiation less than 1000 W/m<sup>2</sup>. The results show that the CII-CPC has achieved a maximum efficiency of 99.99% inactivation of total coliforms, fecal and *E. coli* in the well water. The SODIS-CPC has had a maximum removal efficiency of BOD and COD of 93,08 and 94,94%, respectively. The efficiency of disinfection and degradation depends on the intensity of the incident radiation, the exposure time, TiO<sub>2</sub> concentration and the geometry of the photoreactor.

**Keywords:** Solar energy, Water treatment, Photocatalysis, SODIS, *E. coli*, photoreactor, catalyst, Amazon, disinfection

## I. INTRODUCCIÓN

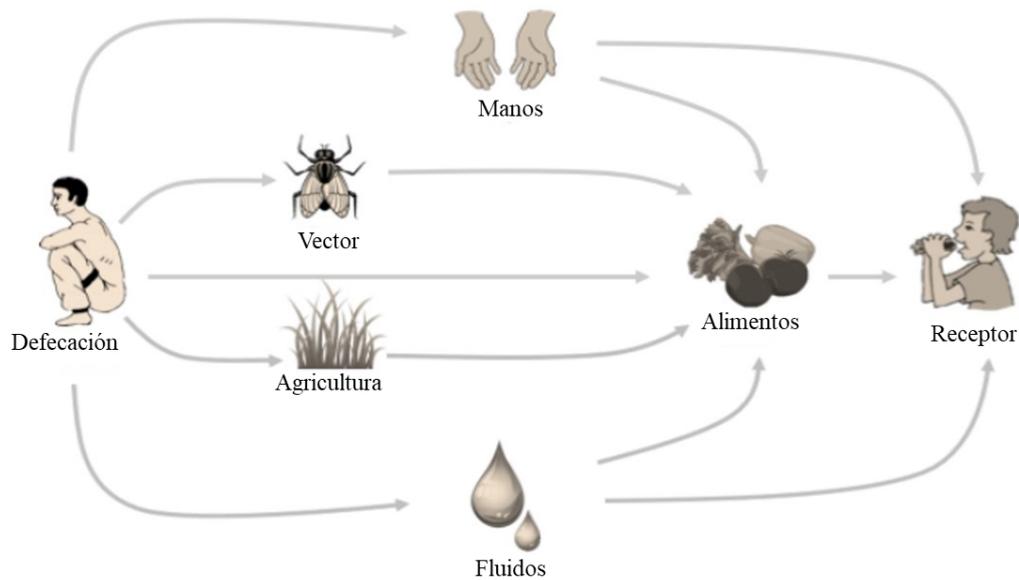
La calidad, cantidad, cobertura y continuidad de servicio de suministro de agua potable y el tratamiento de aguas residuales, es afectado por el crecimiento poblacional, cambio climático y actividades productivas no sostenibles (Qu, Alvarez, & Li, 2013). Debido a ello la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), ha estimado que 3 de cada 10; personas carecen de acceso a agua potable, y 6 de cada 10; carecen de saneamiento seguro en todo el mundo.

En los países de América Latina y El Caribe se considera que 34 millones de personas aún no tienen acceso a agua segura y 106 millones a saneamiento adecuado, incluyendo 18,5 millones que, principalmente en zonas rurales, continúan practicando la defecación al aire libre. Por otro lado, producto del crecimiento urbano esperado en los próximos 15 años, a los 34 y 106 millones de personas que hoy no disponen de agua y saneamiento, se sumarán cerca de 90 millones de habitantes, principalmente en zonas urbanas, que demandarán nuevos servicios (Garzón & Sturzenegger, 2016).

El Perú dispone de un alto porcentaje de recursos hídricos, pero, los datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), revelan el déficit del abastecimiento del agua en el país, ya que, en el periodo de febrero del 2017 a enero del 2018, el 10,6 % de la población total, no tuvo acceso a agua por red pública; asimismo, el 27,3 % de la población no accede a la red de alcantarillado. En el año 2017, la Región Amazonas, alcanzó una cobertura de 6,3% de la población que consumen agua con un nivel de cloro adecuado ( $\geq 0,5 \text{ mgL}^{-1}$ ) proveniente de la red pública; del mismo modo la cobertura del servicio de alcantarillado fue de 51,1% , ubicando a la región por debajo del promedio nacional en el servicio de agua potable (32,8 %) y saneamiento (72,8 %) (INEI, 2018).

Los servicios de agua y saneamiento inexistentes, insuficientes o gestionados de forma inapropiada exponen a la población a riesgos para la salud, ya que, el consumo de agua contaminada con heces favorece la propagación de microorganismos patógenos, incluidos virus, bacterias y parásitos (Figura 1). Estos microorganismos son responsables de diversas enfermedades como el cólera, diarreas, disentería, hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis; además, contribuyen a la desnutrición infantil y al deterioro del crecimiento físico y desarrollo cognitivo (Shannon *et al.*, 2008; Guerrant, Deboer, Moore, Scharf, & Lima, 2013; Pichel, Vivar, & Fuentes, 2019). Se calcula que

unas 842 mil personas mueren cada año por diarrea y aproximadamente 240 millones de personas se ven afectadas por esquistosomiasis, una enfermedad grave y crónica provocada por lombrices parasitarias contraídas por exposición a agua infestada (OMS, 2018).

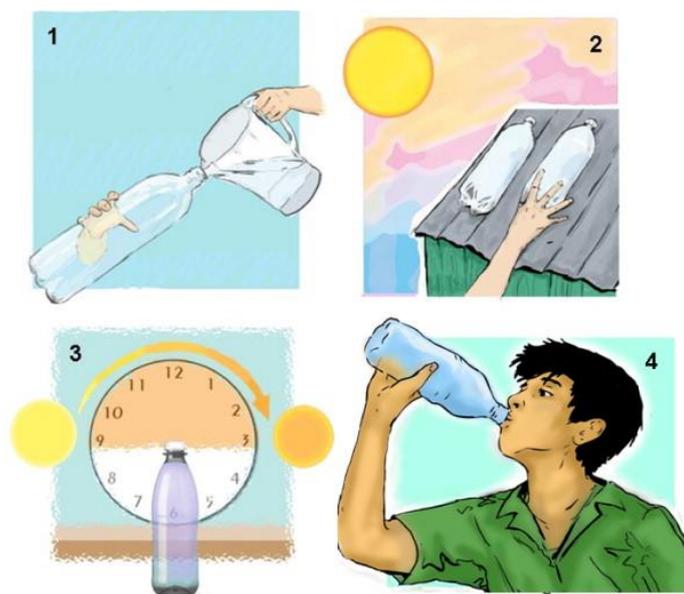


**Figura 1.** Virus, bacterias y parásitos responsables de enfermedades causadas por el agua debido a la falta de instalaciones de saneamiento, malas prácticas de higiene y la ingesta de agua contaminada con heces. Fuente: Pichel *et al.*, (2018).

La mayoría de los patógenos transmitidos por el agua se pueden eliminar físicamente por adsorción / filtración o inactivados por desinfectantes químicos (como cloro libre, dióxido de cloro y ozono) y luz ultravioleta (UV) en los procesos convencionales de tratamiento de agua; sin embargo, estos métodos generan subproductos altamente tóxicos, como los trihalometanos y otros compuestos cancerígenos (Blanco *et al.*, 2009), además, estos procesos son intensivos desde el punto de vista químico, energético y operativo, por ser sistemas que requieren de considerable capital y experiencia en ingeniería e infraestructura, lo que impide su uso masivo en gran parte del mundo (Malato, Fernández-Ibáñez, Maldonado, Blanco, & Gernjak, 2009).

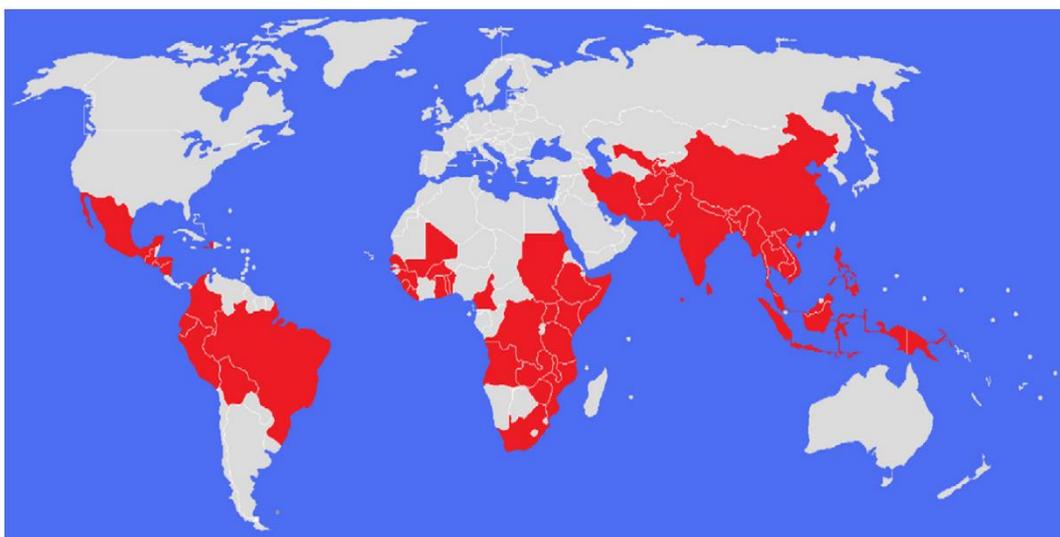
En los últimos años se vienen desarrollando métodos efectivos, de menor costo y eficientes para desinfectar aguas para consumo humano y depuración de aguas residuales, sin impactar negativamente al ambiente o poner en peligro la salud humana por el tratamiento en sí (Zhang, Sivakumar, Yang, Enever, & Ramezani-pour, 2018).

Las tecnologías de tratamiento de agua impulsadas por energía solar son alternativas sostenibles para abordar el problema del agua, ya que, la luz solar está disponible gratuitamente en la Tierra y los efectos combinados del calor y los rayos UV del sol inactivan a los organismos patógenos presentes en el agua. Este es el principio de la desinfección solar del agua (SODIS, por su siglas en inglés), la cual consiste en colocar agua contaminada en recipientes de plástico o vidrio transparentes (normalmente botellas descartables (PET) de bebidas de 2 L) que se exponen al sol durante 6 a 48 h dependiendo de la intensidad de la luz solar y la sensibilidad de los patógenos (Figura 2) (McGuigan *et al.*, 2012 ; Byrne *et al.*, 2015).



**Figura 2.** Descripción gráfica de la técnica de tratamiento de agua por desinfección solar (SODIS). Fuente: McGuigan *et al.*, (2012).

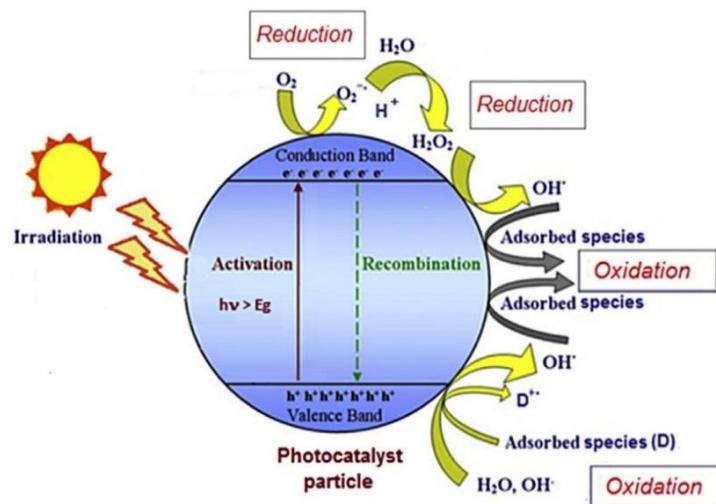
SODIS es reconocido y promovido por la OMS, se estima que hay 4,5 millones de usuarios regulares en todo el mundo, principalmente en África, América Latina y Asia (Figura 3) (Meierhofer & Landolt, 2009; McGuigan *et al.*, 2012). Sin embargo, existen una serie de parámetros que afectan la eficacia de SODIS como son la intensidad solar, temperatura (condiciones climáticas), el nivel y la naturaleza de la contaminación ya que el SODIS no tiene efecto residual, lo que favorece el recrudecimiento bacteriano algunos patógenos son más resistentes a la luz solar que otros. Un enfoque para la mejora de SODIS es el uso de la fotocatalisis (Byrne *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2018).



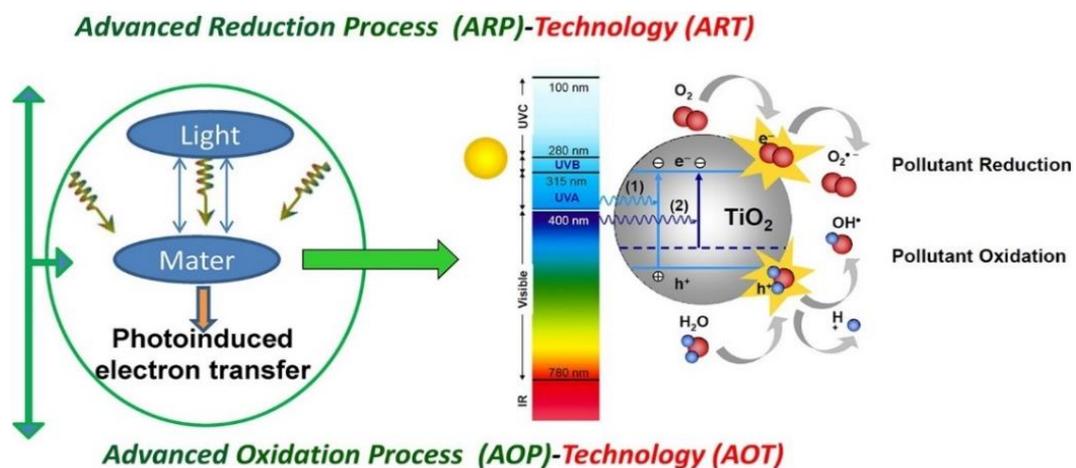
**Figura 3.** Distribución de usuarios regulares de SODIS en el mundo. Fuente: McGuigan *et al.*, (2012).

La fotocatalisis es una de las tecnologías más efectivas para la mineralización de compuestos orgánicos refractarios y patógenos del agua entre los procesos de oxidación avanzada (AOP, por sus siglas en inglés). Los tipos de fotocatalisis en términos de fundamentos incluyen la fotocatalisis heterogénea que emplea catalizadores semiconductores para el tratamiento del agua y la fotocatalisis homogénea que se refiere principalmente al proceso de foto Fenton (Chong, Jin, Chow, & Saint, 2010). En la fotocatalisis heterogénea, la degradación de los compuestos orgánicos recalcitrantes se rige por la acción combinada de un fotocatalizador semiconductor, una fuente de radiación energética y una especie de oxígeno altamente reactiva (Ahmed, Rasul, Martens, Brown, & Hashib, 2011). Entre esos catalizadores semiconductores ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{GaP}$  y  $\text{ZnS}$ ), el  $\text{TiO}_2$  ha recibido el mayor interés, ya que se ha utilizado como fotocatalizador para la descontaminación ambiental debido a su fuerte poder oxidante bajo la radiación ultravioleta, alta estabilidad química, bajo costo (cuarto mineral más abundante en el mundo) y no causar impactos negativos en el ambiente (Borges, Sierra, Méndez-Ramos, *et al.*, 2016).

El principio de fotocatalizador heterogéneo de semiconductores se explica a menudo en función del modelo de banda. Un electrón ( $e^-$ ) en una banda de valencia llena de electrones (VB) se excitará a una banda de conducción (CB) vacía cuando el catalizador semiconductor absorba un fotón con una energía  $h\nu$  igual o mayor que su energía de intervalo de banda. Mientras tanto, un agujero positivo ( $h^+$ ) queda en el VB (Figura 4) (Spasiano, Marotta, Malato, Fernandez-Ibañez, & Di Somma, 2015). En el caso de la fotocatálisis con  $TiO_2$ , el par de orificios de electrones foto generados en la superficie de  $TiO_2$  desencadena una serie de reacciones reductoras oxidativas en cadena normalmente en presencia de agua y oxígeno disueltos (Figura 5) (MiarAlipour, Friedmann, Scott, & Amal, 2018).



**Figura 4.** Mecanismo de un proceso de fotocatálisis heterogéneo. Fuente: Spasiano *et al.*, (2015).



**Figura 5.** Proceso de fotocatálisis del  $TiO_2$ . Fuente: Athanasekou, Likodimos, & Falaras (2018).

La fotocatalisis logra una mineralización completa de los contaminantes y sus compuestos intermedios sin contaminación secundaria, funciona a temperatura y presión ambiente, y a bajos costos de operación (Chong *et al.*, 2010); pero, la mayoría de los estudios de degradación fotocatalítica realizados con suspensiones de TiO<sub>2</sub> en polvo fino en la solución contaminada, complican la filtración de suspensiones de partículas de titanio, además, se listan otras dificultades para su aplicación a gran escala: la optimización del catalizador para mejorar el rendimiento cuántico o para utilizar la luz visible; el diseño eficiente del reactor fotocatalítico y técnicas de recuperación y/o inmovilización del catalizador y mejor selectividad de reacción (Qu *et al.*, 2013; Borges, Hernández, & Esparza, 2014).

Una posible solución para superar estas limitaciones de las tecnologías antes mencionadas, es la combinación de fotocatalisis solar heterogénea, SODIS y la técnica de adsorción (Xing *et al.*, 2018). Las limitaciones de TiO<sub>2</sub> puro, que requieren el uso de luz UV y su alta tasa de recombinación de electrones y agujeros fotogenerados, se pueden superar mediante la aplicación de un soporte adsorbente (Daghrir, Drogui, & Robert, 2013; MiarAlipour *et al.*, 2018). Existen varios materiales que se puede utilizar como soportes para inmovilizar el TiO<sub>2</sub>, entre ellos tenemos vidrio, carbón activado, sílice, polímeros, piedra pómez, zeolitas, ceniza, entre otros (Srikanth *et al.*, 2017; Yahya *et al.*, 2018).

Estudios previos muestran que los materiales de soporte comunes están teniendo una alta eficiencia en el tratamiento de aguas, por ejemplo, Carpio *et al.* (2005) lograron eliminar hasta 20 ppm de fenol del agua contaminada, con el efecto fotocatalítico del carbón activado impregnado con TiO<sub>2</sub> en una botella de tereftalato de polietileno expuesta a radiación solar durante dos días soleados. Ponce *et al.* (2009), establecen que las suspensiones acuosas de TiO<sub>2</sub> sobre el polietileno con iluminación de rango UV (310-400 nm UV-A) tiene un gran potencial para la descontaminación y desinfección del agua para consumo humano.

Polo-López *et al.*, (2011), evaluaron el efecto SODIS con fotorreactores de tubos de vidrio (con y sin fotocatalizador TiO<sub>2</sub>), incorporados en colectores parabólicos compuestos (CPC), logrando la inactivación de una variedad de microorganismos, incluidas las bacterias (*E. coli*) y los hongos (*Fusarium spp.*). Acevedo, Carpio, Rodríguez, & Manzano (2012) han demostrado que en condiciones de 1,5 h

aproximadamente de iluminación solar simulada ( $30 \text{ W}_{\text{UVA}} \text{ m}^{-2}$ ), el catalizador inmovilizado en el interior de un fotorreactor por depósito de sol-gel, tiene similar eficiencia en la desinfección de *E. coli*, como  $0,5 \text{ gL}^{-1}$  de  $\text{TiO}_2$  P25 en solución; y que, es posible eliminar el 100% de las bacterias cubiertas por las regulaciones internacionales con respecto al agua para consumo humano

Gutiérrez-Alfaro, Acevedo, Rodríguez, Carpio, & Manzano (2015) evaluaron la capacidad de desinfección de dos dispositivos artesanales de bajo costo basados en la desinfección fotocatalítica solar (SPC-DIS) compuesto de una botella de plástico (2 L) con un cilindro interior recubierto con  $\text{TiO}_2$  dopado con zinc y un vaso reactor (9 L) con un cilindro interior recubierto con puro  $\text{TiO}_2$ . El frasco SPC-DIS logró una desinfección del 100% de *E. coli*, pero solo el 98,97% para *Enterococcus spp.* y 96,28% para *C. perfringens*. El reactor SPC-DIS logró, en condiciones de funcionamiento óptimas, un 100% de desinfección para *E. coli*, 100% para *Enterococcus spp.* y 99,44% para *C. perfringens*. Borges, Sierra, Cuevas, *et al.* (2016), han logrado la fotodegradación de 95% de contaminante de aguas residuales bajo la radiación solar después de solo 2 h, mediante nanoestructuras cargadas de  $\text{TiO}_2$  en piedra poméz.

Orha, Pode, Manea, Lazau, & Bandas (2017), reportaron un nuevo carbón activado granular modificado con anatasa  $\text{TiO}_2$  (GAC- $\text{TiO}_2$ ) sintetizado mediante el método hidrotermal asistido por microondas. GAC- $\text{TiO}_2$  de material compuesto se utilizó para la eliminación de ácidos húmicos (HA) del agua por la fotocatalisis bajo radiación UV en comparación con el proceso de sorción.

Por ello, en la presente investigación, se evaluó la eficiencia de desinfección de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual de tratamientos por desinfección solar (SODIS-CPC) y fotocatalisis ( $\text{TiO}_2$  en suspensión [ $\text{TiO}_{2\text{susp.}}$  - CPC], catalizador de concreto mezclado con  $\text{TiO}_2$  [CI-CPC] y catalizador de concreto impregnado con  $\text{TiO}_2$  [CII-CPC]) acoplado a un colector parabólico compuesto 1.15 X (CPC 1.15X) y fotorreactor de botella PET de 1,5 L.

## II. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Muestras de agua

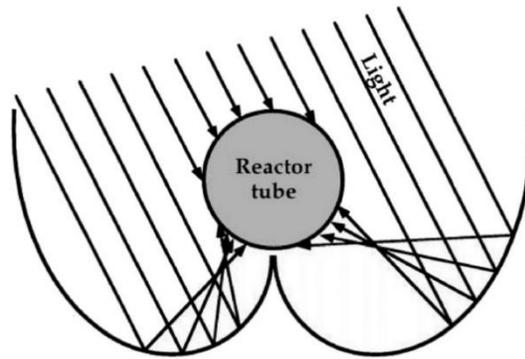
En esta investigación se utilizó muestras de agua de pozo (para evaluar la eliminación de microorganismos patógenos) y agua residual (para evaluar la degradación de materia orgánica). La muestra de agua de pozo fue extraída del punto (P1) con coordenadas  $6^{\circ}13'4.81''\text{S}$  y  $77^{\circ}51'39.81''\text{O}$ , que se encuentra ubicado en el Asentamiento Humano 16 de Octubre; mientras que, las muestras de agua residual fueron tomadas del punto (P2) con coordenadas de  $6^{\circ}13'25.08''\text{S}$  y  $77^{\circ}51'40.59''\text{O}$  de la quebrada de Santa Lucía en la ciudad de Chachapoyas (Figura 5).



**Figura 6.** Ubicación de los puntos de muestreo de agua.

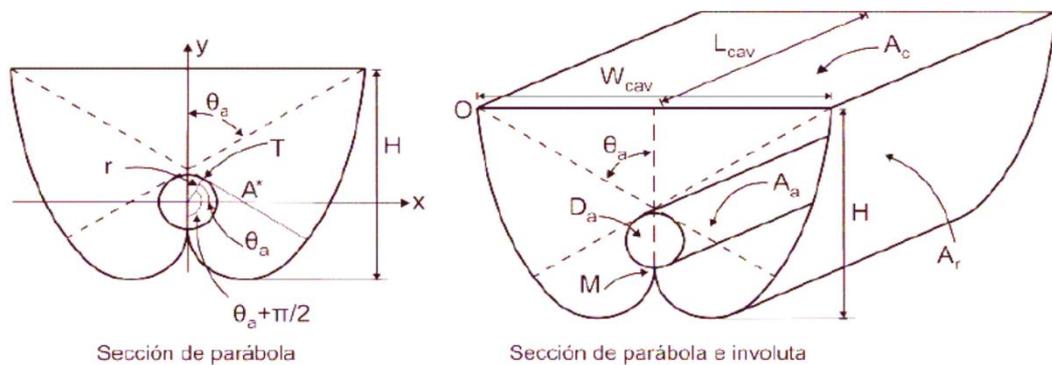
### 2.2. Colector parabólico compuesto

Los colectores parabólicos compuestos (CPC), son un tipo de colector de baja concentración que combinan algunas características de los concentradores parabólicos y los sistemas estacionarios planos. La geometría del CPC permite que el reflector enfoque la luz solar sobre el tubo receptor y, por lo tanto, pueda capturar la luz solar directa y difusa (Figura 6) (Malato *et al.*, 2009; Keane *et al.*, 2014).



**Figura 7.** Perfil del colector parabólico compuesto (CPC). Fuente: Keane *et al.*, (2014).

En el diseño del CPC, intervienen parámetros como el factor de concentración solar, área del reflector, área del tubo receptor (Lara, Velázquez, Saucedo, & Acuña, 2013); los cuales están gobernados por ecuaciones matemáticas, por ejemplo, de una parábola, involuta, circunferencia, etc. que se detalla a continuación (Figura 8) (Salgado-Tránsito, Jiménez-González, Ramón-García, Pineda-Arellano, & Estrada-Gasca, 2015).



**Figura 8.** Geometría de un colector parabólico compuesto (CPC). Fuente: Lara *et al.*, (2013)

El factor de concentración y el ángulo de aceptación de un CPC se relacionan directamente de la siguiente manera (ecuación 1):

$$C_{cpc} = \frac{1}{\sin\theta_a} = \frac{W_{cav}}{\pi D_a} \dots\dots\dots (1)$$

Donde  $C_{cpc}$  es el factor de concentración,  $\theta_a$  es el ángulo de aceptación,  $W_{cav}$  es el ancho de apertura del colector y  $D_a$  es el diámetro del receptor tubular.

La sección de la parábola en el plano (x, y), está establecido por las siguientes ecuaciones (2) y (3):

$$x = r (\text{sen } \varphi - A^* \cos \varphi) \dots \dots \dots (2)$$

$$y = -r(A^* \text{sen } \varphi + \cos \varphi) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Para, } \frac{\pi}{2} + \theta_a \leq \varphi \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a$$

Donde

$$A^* = \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_a + \varphi - \cos(\varphi - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\varphi - \theta_a)}$$

La sección de la involuta en el plano (x, y), está dado por la ecuación (4) y (5)

$$x = \frac{D_a}{2} (\text{sen } \varphi - \varphi \cos \varphi) \dots \dots \dots (4)$$

$$y = -\frac{D_a}{2} (\varphi \text{sen } \varphi + \cos \varphi) \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{Para, } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} + \theta_a$$

El perfil de la circunferencia de tubo receptor en el plano (x, y), es gobernado por las ecuaciones (6) y (7):

$$x = \frac{D_a}{2} (\cos \alpha) \dots \dots \dots (6)$$

$$y = -\frac{D_a}{2} (\text{sen } \alpha) \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{Para, } -\pi \leq \alpha \leq \pi$$

Para calcular el área del reflector CPC ( $A_r$ ) y del absorbedor tubular ( $A_a$ ) se la aplica las ecuaciones (8) y (9) respectivamente:

$$A_r = \sum_{i=0}^{\frac{5\pi}{2}} \sqrt{x^2 + y^2} \dots \dots \dots (8)$$

$$A_a = \pi D_a L_a \dots \dots \dots (9)$$

Donde,  $L_a$  es la longitud del receptor tubular.

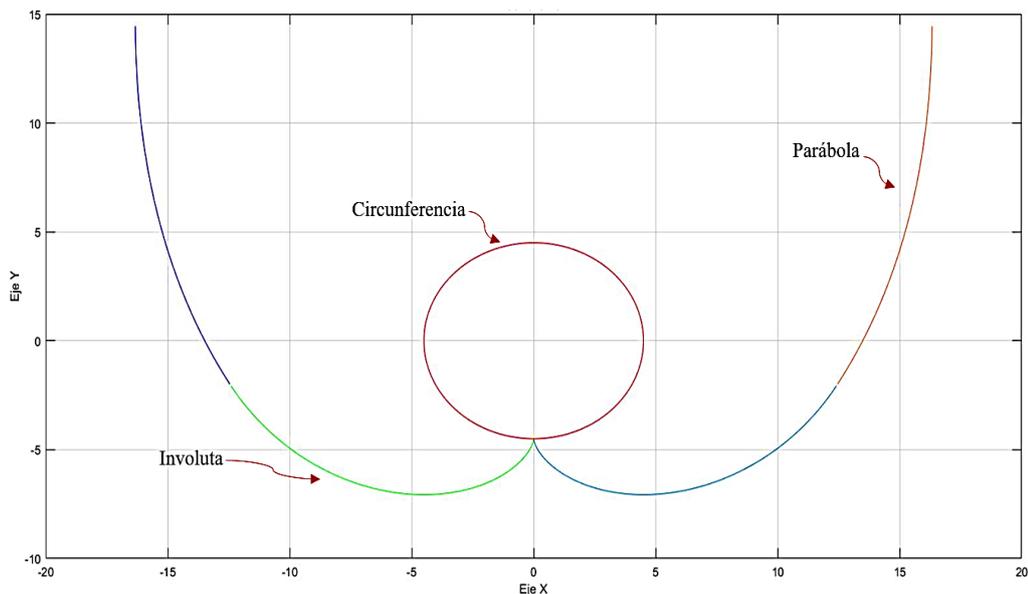
En el presente estudio, se diseñó un colector parabólico compuesto denominado CPC 1.15 X con un receptor tubular de botella de tereftalato de polietileno (PET). El CPC 1.15 X tiene un ángulo de aceptación de 30° y un factor de concentración

1.15, para aprovechar 15 % más de los rayos incidentes en la superficie del colector. La botella PET tiene 9 cm de diámetro y 33 cm de longitud. A partir de las consideraciones anteriores y utilizando las ecuaciones antes mencionadas, se logró obtener un modelo matemático (Tabla 1) del CPC 1.15 X.

**Tabla 1.** Parámetros de diseño del CPC 1.15 X

Parámetro	Características
Sección parabólica en el plano (x,y)	$x = 4.5 \left( \text{sen } \varphi - \left( \frac{\pi + \varphi - \cos(\varphi - \pi)}{1 + \text{sen}(\varphi - \pi)} \right) \cos \varphi \right), \varphi \in \left[ \frac{5\pi}{6}; \frac{7\pi}{6} \right]$ $y = -4.5 \left( \left( \frac{\pi + \varphi - \cos(\varphi - \pi)}{1 + \text{sen}(\varphi - \pi)} \right) \text{sen } \varphi + \cos \varphi \right), \varphi \in \left[ \frac{5\pi}{6}; \frac{7\pi}{6} \right]$
Sección de involuta en el plano (x,y)	$x = 4.5 (\text{sen } \varphi - \varphi \cos \varphi), \varphi \in \left[ -\frac{5\pi}{6}; \frac{5\pi}{6} \right]$ $y = -4.5 (\varphi \text{sen } \varphi + \cos \varphi), \varphi \in \left[ -\frac{5\pi}{6}; \frac{5\pi}{6} \right]$
Perfil de la circunferencia del receptor tubular en el plano (x, y)	$x = 4.5 (\cos \alpha), \alpha \in [-\pi; \pi]$ $y = -4.5 (\text{sen } \alpha), \alpha \in [-\pi; \pi]$
Área del reflector	0,25 m <sup>2</sup>
Área del receptor tubular	0,09 m <sup>2</sup>

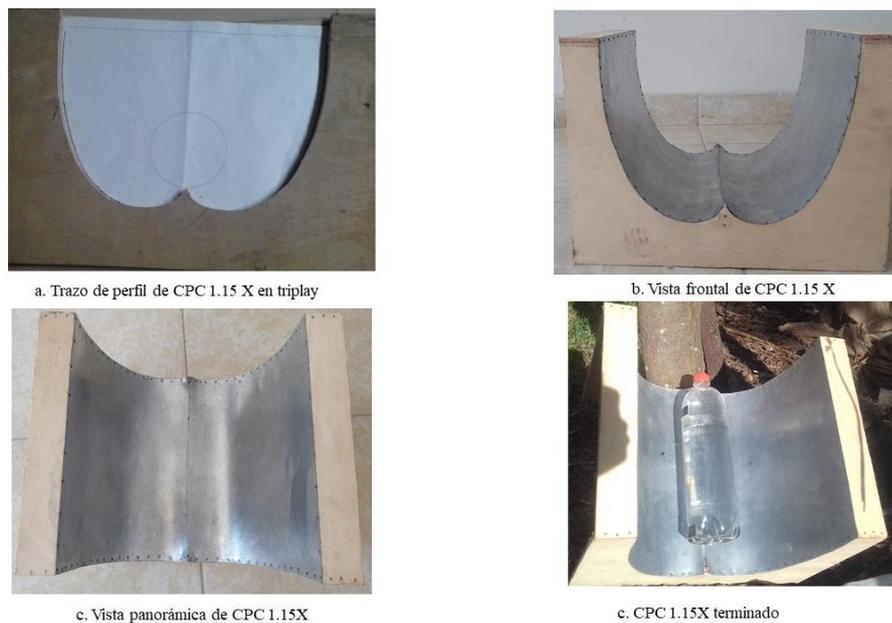
Para graficar el perfil en el plano (x , y) del colector se procedió a ingresar los códigos del modelo en el software Matlab R2017a, obteniendo la gráfica que se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Perfil del CPC 1.15 X en el plano (x , y).

Para la construcción del CPC 1.15 X, se imprimió el perfil del CPC en tamaño de 1:1, en hoja A3. Luego, en dos tableros de triplay de 40 cm de ancho y 25 cm de

alto y 1 cm de espesor, se realizó el trazo del CPC; seguidamente, se procedió a cortarlos con una sierra cinta siguiendo la curva parabólica e involuta. Estos perfiles se unieron en la parte superior con cintas de triplay de 37 cm de largo, 5 cm de ancho y 1 cm de espesor (Figura 10). Para la superficie reflectora se utilizó una plancha de acero galvanizado de 2 mm de espesor, 37 cm de largo y 70 cm de ancho; esta plancha fue fijada con clavos de una pulgada, alrededor de la silueta de los perfiles de triplay, además se colocó, dos sujetadores en la parte central del CPC para poner la botella (Figura 10).



**Figura 10.** Colector parabólico compuesto 1.15 X.

### 2.3. Catalizador de concreto impregnado de dióxido de titanio

El diseño del catalizador se desarrolló en base a la forma geométrica de un cilindro con las ecuaciones siguientes:

$$\text{Área lateral: } Al = \pi dh \dots\dots\dots(10)$$

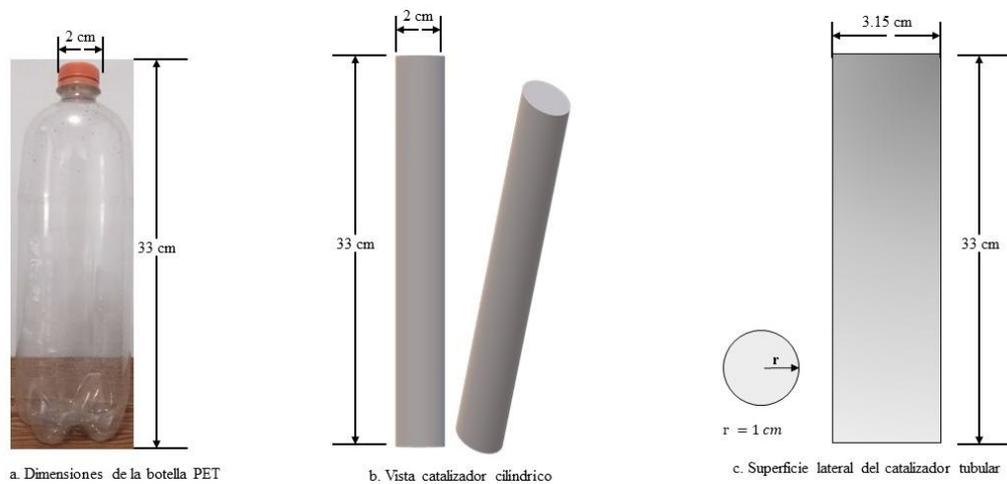
$$\text{Área total : } At = \pi d(h + \frac{d}{2}) \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{Volumen : } V = \pi \frac{d^2}{4} h \dots\dots\dots(12)$$

Donde, h es la altura y d es el diámetro de la base del cilindro.

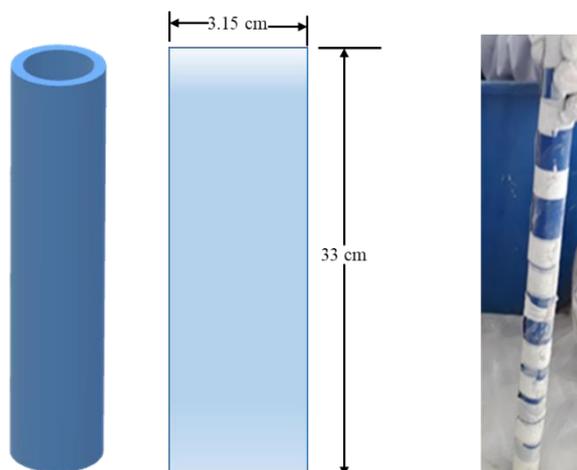
Las dimensiones del catalizador cilíndrico fueron hechas a partir de las medidas de la botella PET, 2 cm de abertura de boca y 33 cm de altura, y usando las ecuaciones (10) a la (12), se obtuvo las siguientes proporciones (Figura 11):

Diámetro de la base del catalizador	: 2 cm
Longitud del catalizador	: 33 cm
Área lateral del catalizador	: 207,4 cm <sup>2</sup>
Área total del catalizador	: 213,6 cm <sup>2</sup>
Volumen	: 103,7 cm <sup>3</sup>



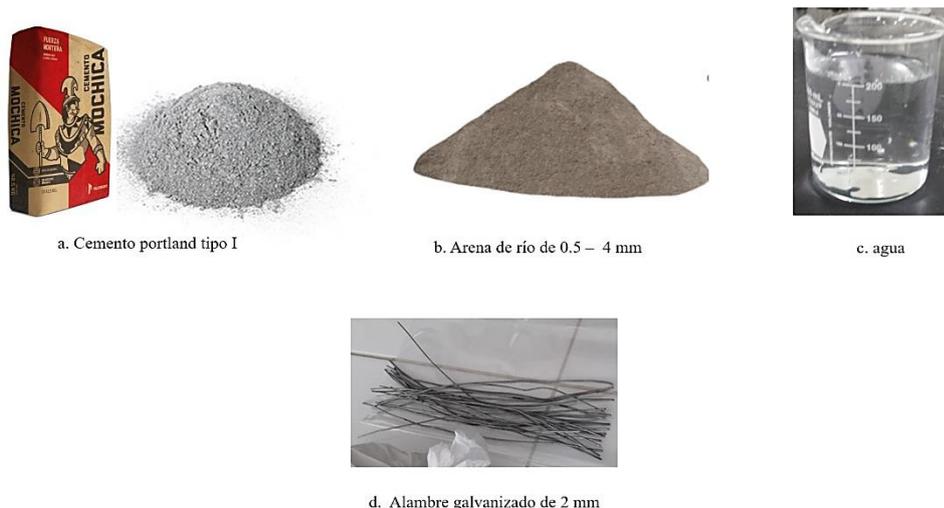
**Figura 11.** Diseño del catalizador

Para la elaboración del molde del catalizador se cortó rectángulos de cartulina plástica de 3,15 cm de ancho y 33 cm de longitud, estas cartulinas fueron envueltas alrededor con un tubo de 3/8 de pulgada de diámetro y fijado con cinta (Figura 12).



**Figura 12.** Molde del catalizador cilíndrico

En la norma E.060 del Reglamento Nacional de Edificaciones establece que cuando un concreto va a ser expuesto al agua debe tener una relación máxima agua: material cementante (en peso) de 0,50 y un resistencia específica a la compresión de  $280 \text{ kg/cm}^2$ . En base esta premisa, para elaboración de los catalizadores, se ha realizado una mezcla de cemento portland tipo I, arena de río de 0,5 – 4 mm de diámetro y agua en proporción de 1:2:2 respectivamente, además, un alambre galvanizado de 2 mm de espesor como soporte (**ver Figura 13**).



**Figura 13.** Materiales para la elaboración de los catalizadores

Según Castro *et al.*, (2011), dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) con una concentración 70:30 anatasa: rutilo, área superficial  $55 \pm 15 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  y tamaño de partícula promedio de 30 nm, tiene un alto rendimiento en los procesos de fotocátalisis. Por ello, se ha adquirido dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) comercial (Degussa P-25) de laboratorios Pflücker e hijos S.A.C., mientras que, la impregnación del  $\text{TiO}_2$  se realizó a través de métodos aplicados por Shen, Burton, Jobson, & Haselbach (2012), con cantidad óptima de  $\text{TiO}_2$ , en ambos métodos, de 86,1 g por metro cuadrado de superficie total del catalizador.

**Método 1 (Mezcla de concreto -  $\text{TiO}_2$ ):** Consiste en mezclar el  $\text{TiO}_2$  con cemento, arena y agua en recipiente para luego depositar en el molde del catalizador.

**Método 2 (Deposición de  $\text{TiO}_2$  sobre concreto):** Consiste diluir el  $\text{TiO}_2$  en agua y luego aplicarlo sobre la superficie del catalizador.

A los catalizadores impregnados de TiO<sub>2</sub> por el método 1, se les nombro “CI”, y por método 2, “CII”. Se elaboró 20 catalizadores en total (10 CI y 10 CII) con la mezcla de cemento, arena y agua en las proporciones mencionadas anteriormente, para el caso de C-I se agregó 1,8 g de TiO<sub>2</sub> por catalizador a la mezcla, después se vertió en los moldes y se dejó secar a 25 °C de temperatura por 7 días, con hidratación cada 24 horas, luego de estas condiciones, para el caso de C-II, se procedió a diluir 1,8 g de TiO<sub>2</sub> en 10 mL por catalizador y se aplicó con un pincel sobre toda la superficie del concreto, posteriormente, se dejó secar a temperatura ambiente (Figura 14).



**Figura 14.** Impregnación de TiO<sub>2</sub> en concreto

A los catalizadores obtenidos por ambos métodos, se realizó el cálculo de porosidad, medida de espacios vacíos en el catalizador, calculada a través de la masa seca (W<sub>d</sub>) y la masa sumergida (W<sub>s</sub>), utilizando la ecuación (13). Las propiedades de los catalizadores obtenidos se detallan en la Tabla 2.

$$P(\%) = \left( 1 - \frac{W_d - W_s}{\rho_w V_t} \right) \times 100 \dots \dots \dots (13)$$

Donde:

$\rho_w$  : Densidad del agua (1 g cm<sup>-3</sup>)

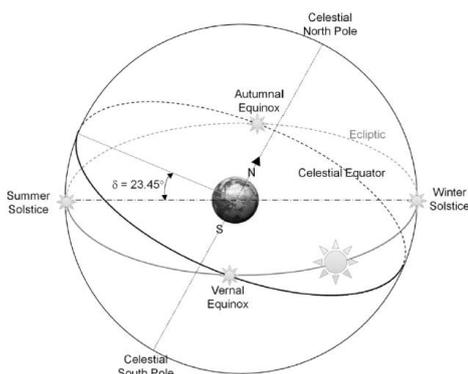
$V_t$ : Volumen total del catalizador

**Tabla 2.** Propiedades del catalizador de concreto impregnado con TiO<sub>2</sub>

Propiedades	Catalizador CI	Catalizador CII
Peso seco	300 g	302 g
Peso sumergido	210 g	215 g
Volumen	103,7 cm <sup>3</sup>	103,7 cm <sup>3</sup>
Porosidad	13,2 %	16,1 %

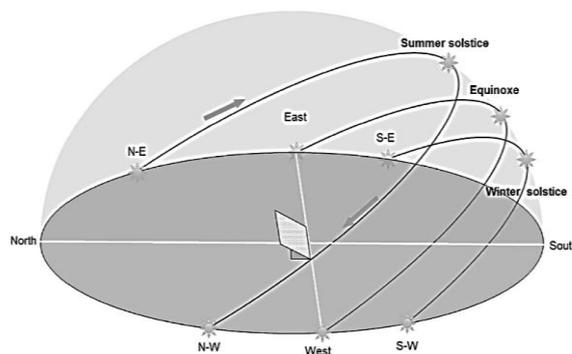
#### 2.4. Instalación del sistema de tratamiento fotocatalítico

Para aprovechar la máxima radiación solar, se debe tener en consideración, que la Tierra gira alrededor de un eje polar que se inclina en un ángulo de 23,45 desde el plano normal al elíptico (Figura 15). La rotación de la tierra alrededor de este eje provoca el cambio diurno en el ingreso de radiación y la posición de este eje con respecto al sol provoca cambios estacionales (Figura 16) (Notton, 2017).



**Figura 15.** Influencia de la rotación de la tierra sobre la radiación solar.

Fuente: Notton (2017).

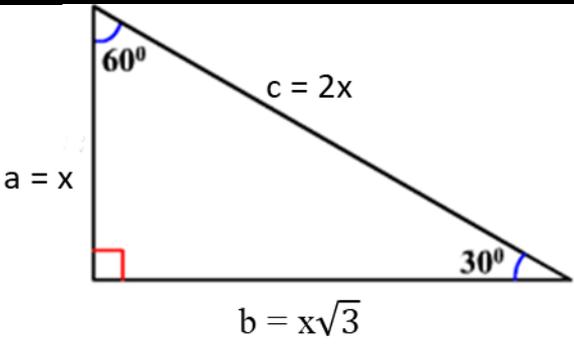


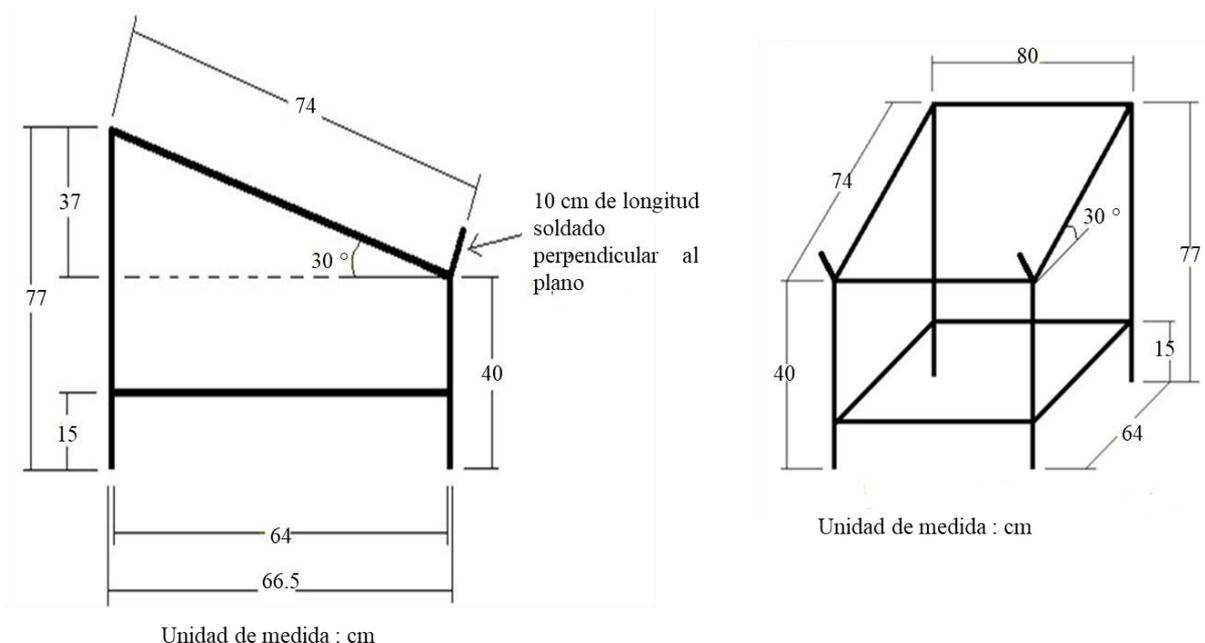
**Figura 16.** Trayectoria del sol según el periodo del año. Fuente: Notton (2017).

Debido a lo anterior, el sistema de tratamiento, fue instalado en la azotea del domicilio del autor de la investigación en la ciudad de Chachapoyas ( $6^\circ 13'34.11''S$  y  $77^\circ 51'51.91''O$ ), en la dirección norte-sur, con el lado sur levantado  $30^\circ$  (suma del ángulo de latitud sur de la ubicación del sistema más el  $23,45^\circ$  de la rotación de la Tierra) de inclinación para compensar la curvatura terrestre.

Para lograr dicha inclinación se ha construido un soporte de fierro corrugado de ½ pulgada de espesor. Las medidas del soporte fueron calculadas de acuerdo a las relaciones trigonométricas de un triángulo rectángulo de 30 grados (Tabla 3), y dimensiones base del plano inclinado de 80 cm ancho y 74 cm de longitud (superficie para instalar 4 CPC 1.15 X), además, se ha tenido en consideración una altura sobre el suelo de 40 cm para que el agua de lluvia no afecte a la superficie reflectante del colector (Figura 17 y 18).

**Tabla 3 .** Relaciones trigonométricas de un triángulo rectángulo 30 y 60 grados.

Triángulo	Relación trigonométrica
	$\text{sen} = \frac{a}{c} = \frac{x}{2x} = 0.5$ $\text{cos} = \frac{b}{c} = \frac{x\sqrt{3}}{2x} = 0.866$ <p>Entonces, para las medidas del soporte tenemos :</p> $c = 74 \text{ cm} , a = 37 \text{ cm} , b = 64 \text{ cm}$



**Figura 17.** Medidas del soporte del CPC 1.15 X.



**Figura 18.** Instalación de los CPC 1.15 X sobre el soporte.

## 2.6. Tratamientos

Los tratamientos aplicados para evaluar la desinfección de microorganismos patógenos de agua de pozo y degradación de materia orgánica de aguas residuales son los siguientes:

- **Tratamiento SODIS – CPC (T<sub>0</sub>):** consistió en exponer el agua de pozo y el agua residual a la radiación solar, en una botella PET trasparente de 1,5 L (receptor tubular) sobre el CPC 1.15 X.
- **Tratamiento TiO<sub>2</sub> en suspensión – CPC (T<sub>1</sub>):** Consistió en agregar TiO<sub>2</sub> en polvo al agua de pozo y el agua residual, con una concentración de 1 g L<sup>-1</sup>, recomendado por Threrujirapong, Khanitchaidecha, & Nakaruk (2017), luego se expuso a la radiación solar en una botella PET trasparente de 1,5 L (receptor tubular) sobre el CPC 1.15 X.
- **Tratamiento con CI - CPC (T<sub>2</sub>):** En este tratamiento, se insertó el catalizador CI dentro de la botella PET trasparente de 1,5 L (receptor tubular) que contenía el agua de pozo y el agua residual, en seguida se expuso a la radiación solar sobre el CPC 1.15 X.

- **Tratamiento con CII – CPC (T3):** Para este tratamiento, se insertó el catalizador CII dentro de la botella PET trasparente de 1,5 L (receptor tubular) que contenía el agua de pozo y el agua residual, y posteriormente se expuso a la radiación solar sobre el CPC 1.15 X.

Para aplicar los tratamientos se realizó el procedimiento siguiente:

- Se realizó la filtración de las muestras del agua de pozo y del agua residual.
- Las botella PET de 1,5 L, se llenó los dos tercios de su volumen de agua, luego se agitó vigorosamente durante 30 segundos, en seguida se la llenó completamente.
- Para mejorar la concentración de los rayos solares sobre los colectores CPC 1.15X se acopló un espejo sobre el soporte.

## 2.5. Evaluación experimental

Las evaluaciones de eficiencia de desinfección de agua se realizaron en septiembre, en los días 09, 12, 16 y 19; mientras que las evaluaciones de degradación de materia orgánica se realizaron entre setiembre (en los días 23 y 30) y octubre (en los días 7 y 12), con exposición a la radiación de 8 horas desde las 8:00 am hasta las 4 pm (Figura 18 y 19).



**Figura 19.** Experimento de desinfección de agua de pozo con los tratamientos: T0 (SODIS-CPC), T1 ( $\text{TiO}_{2\text{susp.}}$  – CPC), T2 (CI-CPC) y T3 (CII-CPC).



**Figura 20.** Experimento de degradación de materia orgánica de agua residual con los tratamientos: T0 (SODIS-CPC), T1 ( $\text{TiO}_{2\text{susp.}}$  – CPC), T2 (CI-CPC) y T3 (CII-CPC).

## 2.7. Medición de la radiación solar

La radiación solar fue medida cada media hora en los días de evaluación, dicha información fue registrada por la estación meteorológica del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Además, para estimar la radiación UV se tuvo en consideración que la energía solar está compuesta por 52% de radiación infrarroja ( $> 700 \text{ nm}$ ), el 43% es radiación de luz visible ( $400\text{--}700 \text{ nm}$ ) y 5% está en el rango ultravioleta ( $<400 \text{ nm}$ ) (Colmenares, 2019).

## 2.8. Medición de la temperatura

La medición de la temperatura del agua se realizó con termohidrómetro digital (MODEL: 3003C), en intervalos de 30 minutos, en cada uno de los tratamientos aplicados. La temperatura ambiente fue registrada en la estación meteorológica del INDES-CES.

## 2.9. Análisis de los parámetros microbiológico y materia orgánica

Para el realizar la caracterización del agua de pozo y agua residual, se tomó muestra días previos a los experimentos, en la misma fuente. En los días de experimentación se trasladó en agua de la fuente en un balde de 20 L color blanco.

Las muestras de agua de pozo fueron recolectadas en frascos de vidrio estéril de 1 L; mientras que, las muestras de agua residual fueron tomadas en frasco de color negro de 1,5 L. Los frascos fueron etiquetados para su identificación y análisis en el Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas del INDES-CES.

Los parámetros microbiológicos evaluados en el agua de pozo fueron: pH, coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli*. Los parámetros evaluados en el agua residual fueron: pH, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

## 2.10. Cálculo de eficiencia

La eficiencia (%  $\eta$ ) de inactivación de microorganismos patógenos de agua de pozo y degradación de materia orgánica de agua residual fue calculada por la ecuación (13).

$$\eta = \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \times 100 \dots\dots\dots (13)$$

Donde  $C_{inicial}$ , es la concentración antes del tratamiento, y  $C_{final}$ , concentración después del tratamiento.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Desinfección del agua de pozo

##### 3.1.1. Caracterización inicial del agua de pozo

La caracterización microbiológica del agua de pozo antes del tratamiento se detalla en la Tabla 4.

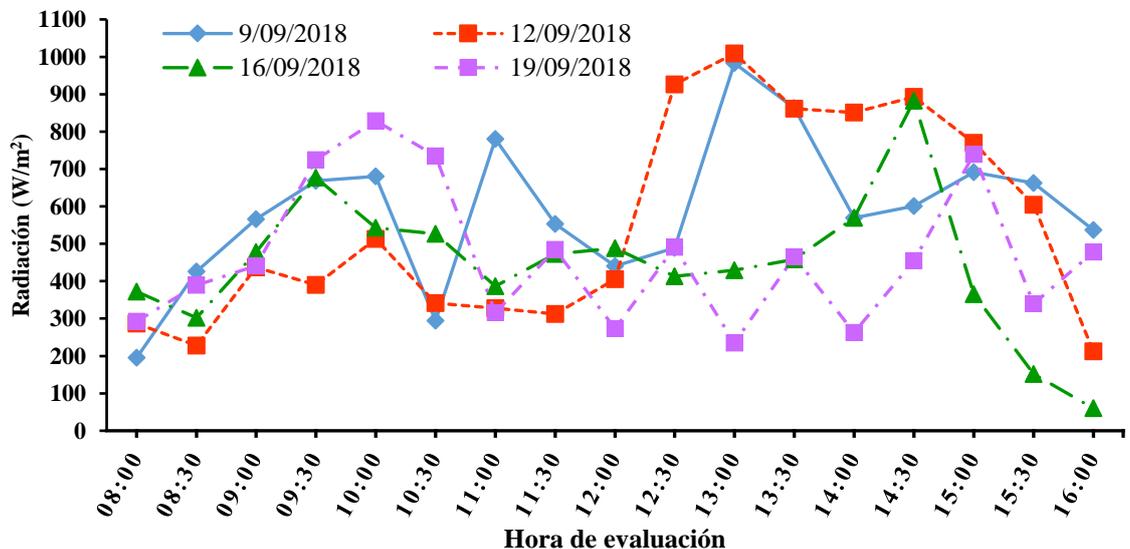
**Tabla 4.** Parámetros de calidad del agua de pozo.

Parámetro	Unidad	Agua de pozo
pH	pH	5,9
Coliformes Totales	NMP/100mL	48
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1700
<i>E. coli</i>	NMP/100mL	11
Estreptococos	NMP/100mL	< 1,8
Enterococos	NMP/100mL	< 1,8
<i>Salmonella</i>	Presencia/Ausencia	Ausencia
<i>Vibrio Cholerae</i>	Presencia/Ausencia	Ausencia

**Fuente:** Laboratorio de Investigación de Suelos y Agua del INDES-CES.

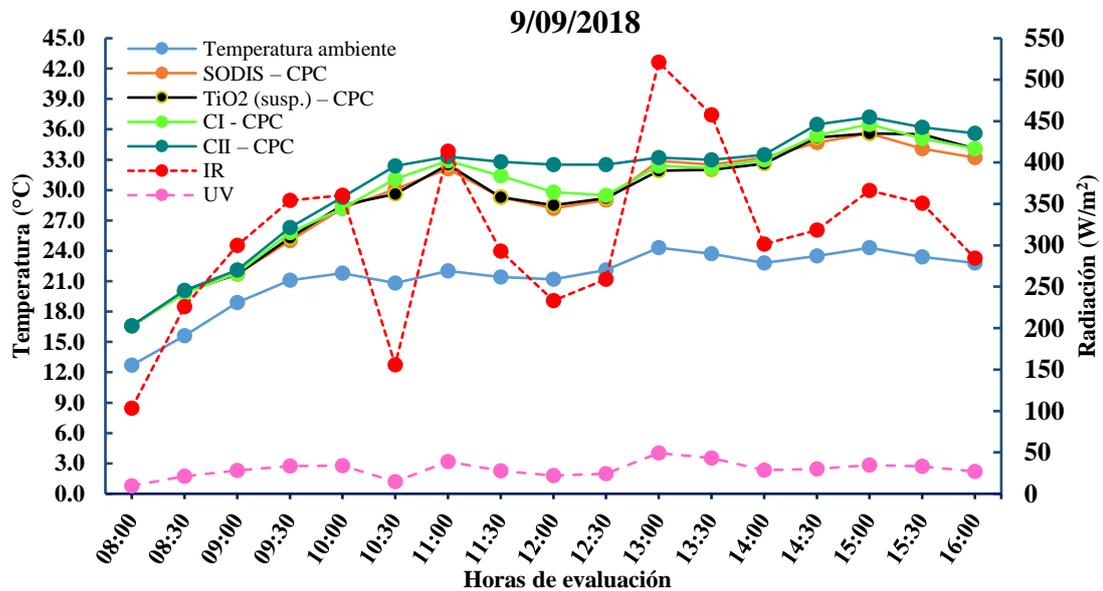
##### 3.1.2. Radiación solar y temperatura

En la Figura 21, se presenta la variación de la radiación solar durante las horas (8:00 16:00) y los días evaluados, en todos los casos la radiación se encuentra en el rango de 60 a 1009 W/m<sup>2</sup>.

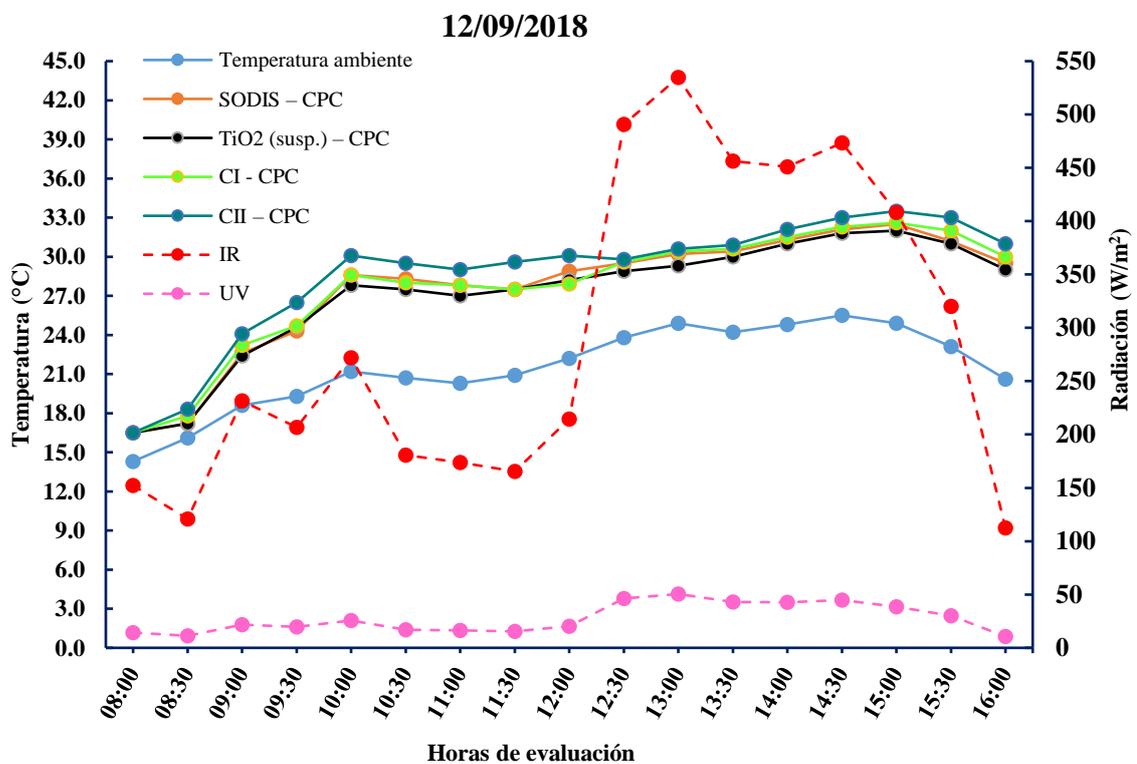


**Figura 21.** Radiación solar de los días evaluados en la desinfección de agua de pozo

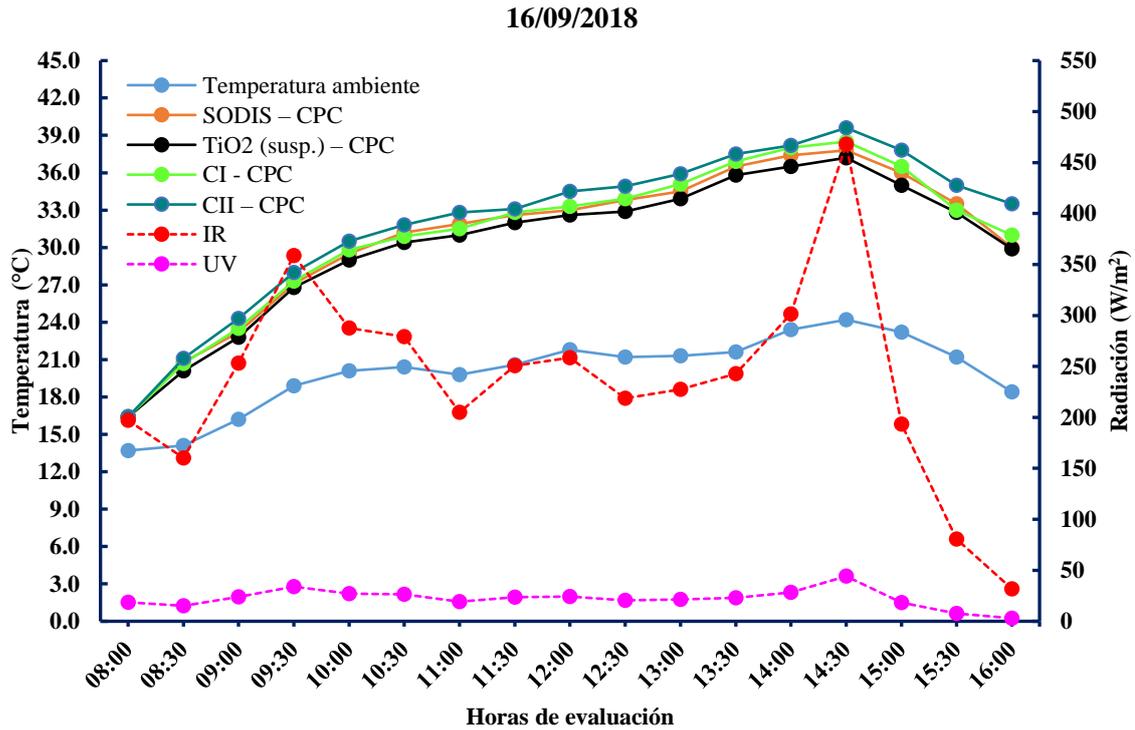
Las Figuras 22, 23, 24 y 25, muestran que las temperaturas del agua en los tratamientos oscilan entre 15 a 42 °C, mientras que la temperatura ambiente no supera los 27 °C, así mismo, la radiación infrarroja (IR) es menor a los 550 W/m<sup>2</sup> y la radiación ultravioleta no supera los 50 W/m<sup>2</sup>, todos los días evaluados.



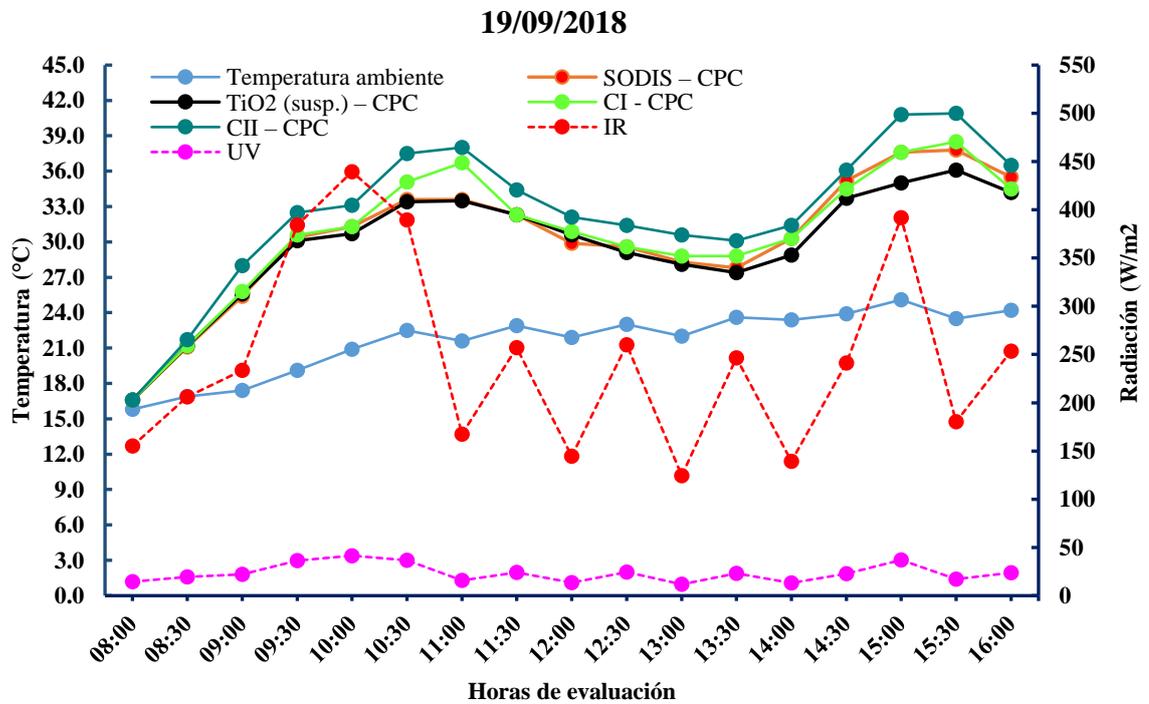
**Figura 22.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 9/09/2018.



**Figura 23.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 12/09/2018.



**Figura 24.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 16/09/2018.



**Figura 25.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 19/09/2018.

### 3.1.3. pH

En la Figura 26, se presenta el pH del agua de cada uno de los tratamientos después del experimento, de acuerdo, a los días evaluados (09, 12 de septiembre y 16 a 19 de octubre).

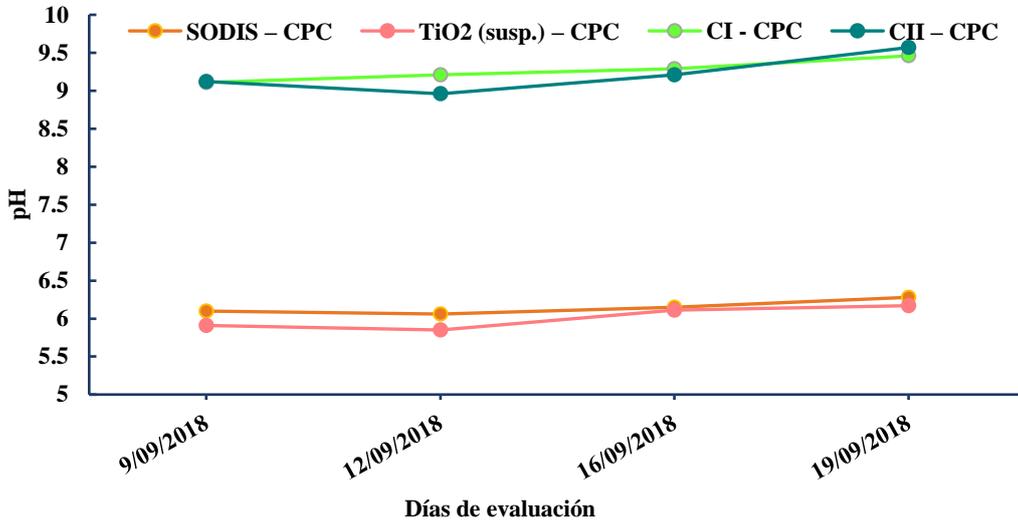


Figura 26. Variación del pH del agua según el tratamiento en los días evaluados.

### 3.1.3. Inactivación de Coliformes totales

El tratamiento CII - CPC, logro la inactivación de coliformes totales, en los días 16/09/2018 y 19/09/2018 con concentración  $<1.8$  NMP/100mL en ambos casos (ver figura 27), y temperatura máxima alcanzado del agua dentro de la botella PET en el CPC 1.15 X fue de 39,6 y 40,6 ° C respectivamente, bajo condiciones de un radiación UV máxima de 44 y 41 W/m<sup>2</sup> en los días antes mencionados (Tabla 5).

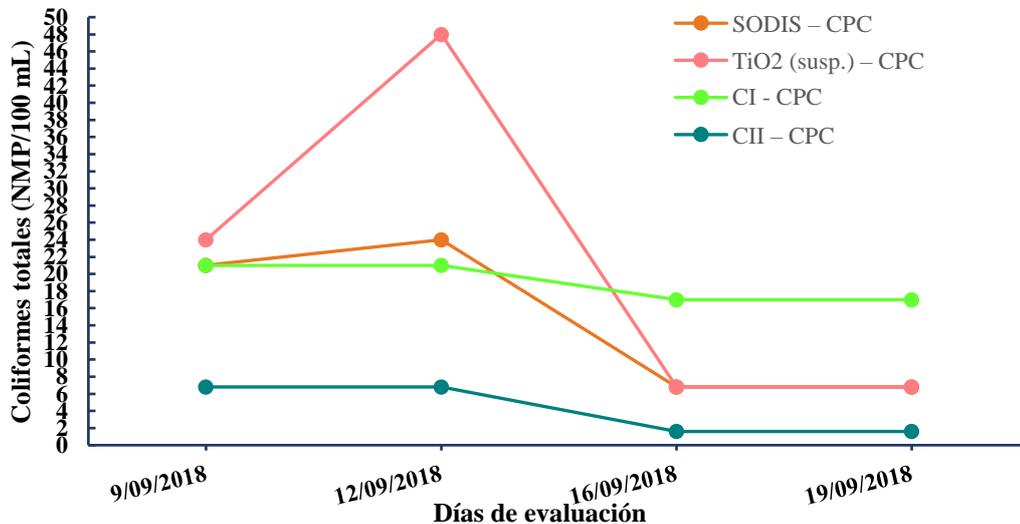


Figura 27. Inactivación de coliformes totales según los tratamientos durante los días de evaluación

### 3.1.4. Inactivación de Coliformes fecales

El tratamiento CII – CPC ha logrado inactivar coliformes fecales en 3 de 4 días de evaluación, por su parte el tratamiento  $\text{TiO}_2$  (susp.) – CPC y SODIS – CPC han disminuido la concentración a  $< 1,8$  NMP/100 mL en los dos últimos días de evaluación (Figura 28). Cada uno de los tratamientos ha tenido efecto según los parámetros evaluados (Tabla 6).

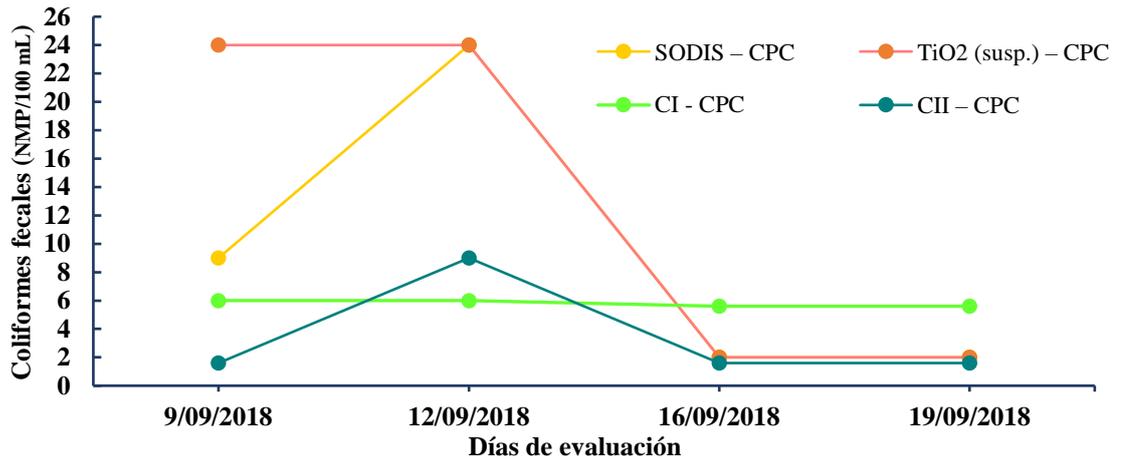
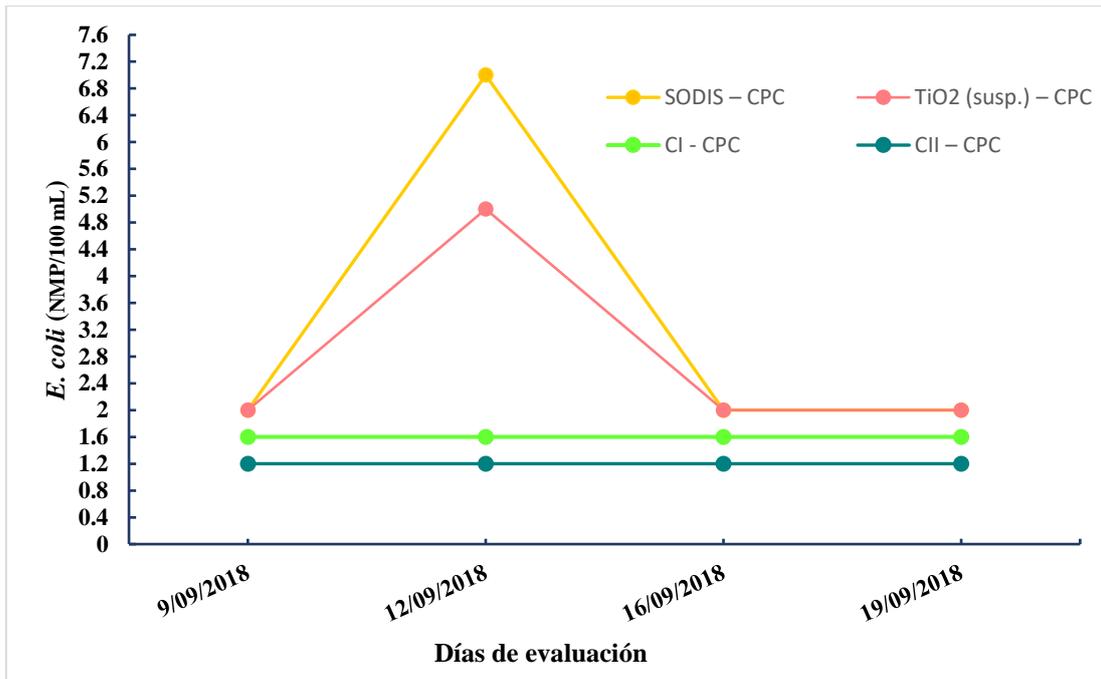


Figura 28. Inactivación de coliformes fecales según tratamiento en los días evaluados.

### 3.1.5. Inactivación de *E. coli*

Los tratamientos CI – CPC (color verde en gráfico) y CII – CPC (color azul en gráfico) inactivaron en totalidad *E. coli* del agua de pozo en todos los días evaluados con concentración  $< 1.8$  NMP/100 mL. Los otros dos tratamientos tuvieron el igual efecto en los días 16/09/2018 y 19/09/2018 disminuyendo la concentración de *E. coli* a 2 NMP/100 mL (Figura 29). Por otro lado, en la Tabla 7, se muestra los valores máximos de los parámetros que influyeron en la inactivación de *E. coli*, así como el rendimiento de cada uno de los tratamientos. El tratamiento SODI-CPC en el día 12/09/2018 ha reportado una eficiencia de 36,36 % (la más baja de todos los tratamientos), el cual la temperatura máxima del agua alcanzó 32,5 °C con una incidencia de radiación UV 50 W/m<sup>2</sup>.



**Figura 29.** Inactivación de *E. coli* según los tratamientos aplicados y los días evaluados.

**Tabla 5.** Resultados de inactivación de coliformes totales según los tratamientos, días y parámetros evaluados.

Fecha de experimento (dd/mm/aa)	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )			Tratamientos															
					SODIS – CPC				TiO <sub>2</sub> (susp.) – CPC				CI - CPC				CII – CPC			
		Total	IR	UV	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Total. (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	21	56.25	5.91	35.6	24	50.00	9.11	36.5	21	56.25	9.12	37.2	6,8	85.83
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6,06	32.5	24	50.00	5,85	32	48	0.00	9,21	32.6	21	56.25	8,96	33.5	6,8	85.83
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	6,8	85.83	6.11	37.2	6,8	85.83	9.29	38.5	17	64.58	9.21	39.6	<1,8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6,28	37.8	6,8	85.83	6,17	36.1	6,8	85.83	9,46	38.5	17	64.58	9,57	40.9	<1,8	99.99

**Tabla 6.** Resultados de inactivación de coliformes fecales según los tratamientos, días y parámetros evaluados.

Fecha de experimento (dd/mm/aa)	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )			Tratamientos															
					SODIS – CPC				TiO <sub>2</sub> (susp.) – CPC				CI - CPC				CII – CPC			
		Total	IR	UV	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	Col. Fecal. (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	24	98.58	5.91	35.6	24	98.58	9.11	36.5	6	99.64	9.12	37.2	<1,8	99.99
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6,06	32.5	24	98.58	5,85	32	24	98.58	9,21	32.6	6	99.64	8,96	33.5	9	99.47
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	2	99.88	6.11	37.2	2	99.88	9.29	38.5	5,6	99.67	9.21	39.6	<1,8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6,28	37.8	2	99.88	6,17	36.1	2	99.88	9,46	38.5	5,6	99.67	9,57	40.9	<1,8	99.99

**Tabla 7.** Resultados de inactivación de *E. coli* según los tratamientos, días y parámetros evaluados.

Fecha de experimento (dd/mm/aa)	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )			Tratamientos															
					SODIS – CPC			TiO <sub>2</sub> (susp.) – CPC			CI - CPC			CII – CPC						
		Total	IR	UV	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	% η
9/09/2018	24.3	983	521	49	6.1	35.6	2	81.81	5.91	35.6	2	81.81	9.11	36.5	<1,8	99.99	9.12	37.2	<1,8	99.99
12/09/2018	25.5	1001	531	50	6,06	32.5	7	36.36	5,85	32	5	54.54	9,21	32.6	<1,8	99.99	8,96	33.5	<1,8	99.99
16/09/2018	24.2	883	468	44	6.15	37.8	2	81.81	6.11	37.2	2	81.81	9.29	38.5	<1,8	99.99	9.21	39.6	<1,8	99.99
19/09/2018	25.1	829	439	41	6,28	37.8	2	81.81	6,17	36.1	2	81.81	9,46	38.5	<1,8	99.99	9,57	40.9	<1,8	99.99

### 3.2. Degradación de materia orgánica de agua residual

#### 3.2.1. Caracterización del agua residual

Los principales parámetros de materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO) del agua residual de la quebrada Santa Lucía se detallan en la Tabla 7.

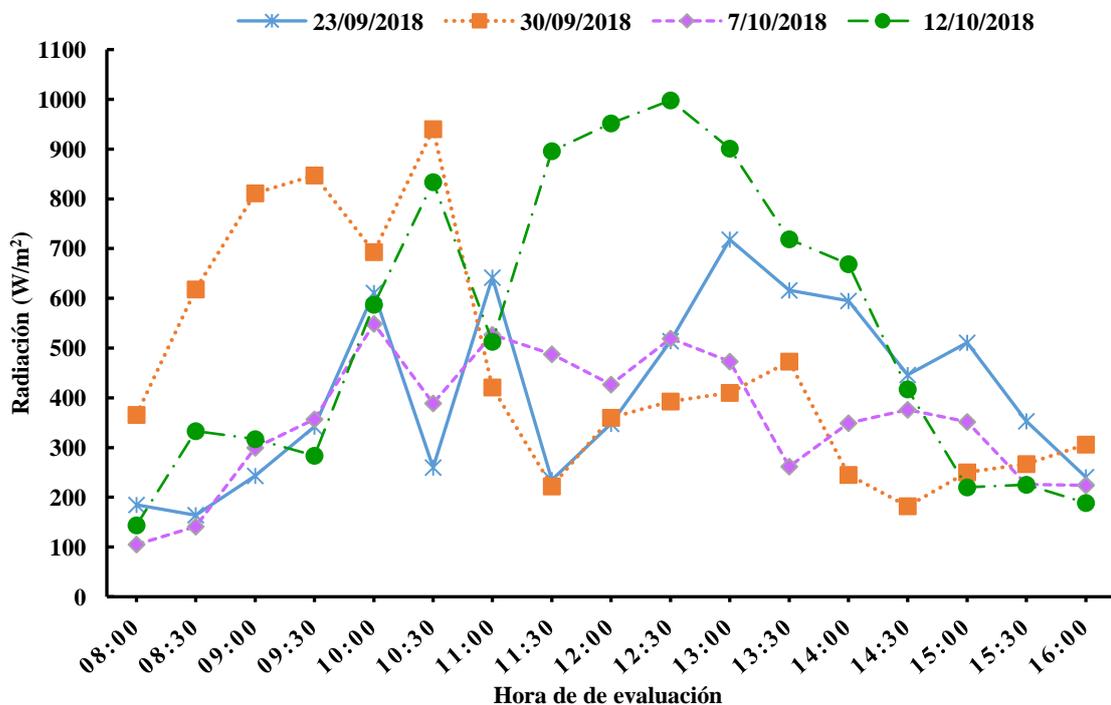
**Tabla 8.** Parámetros de materia orgánica del agua residual de la quebrada Santa Lucía

Parámetro	Unidad	Agua residual
pH	pH	6,5
DBO <sub>5</sub>	mg/L de O <sub>2</sub>	351,6
DQO	mg/L de O <sub>2</sub>	408

Fuente: Laboratorio de Investigación de Suelos y Aguas del INDES-CES.

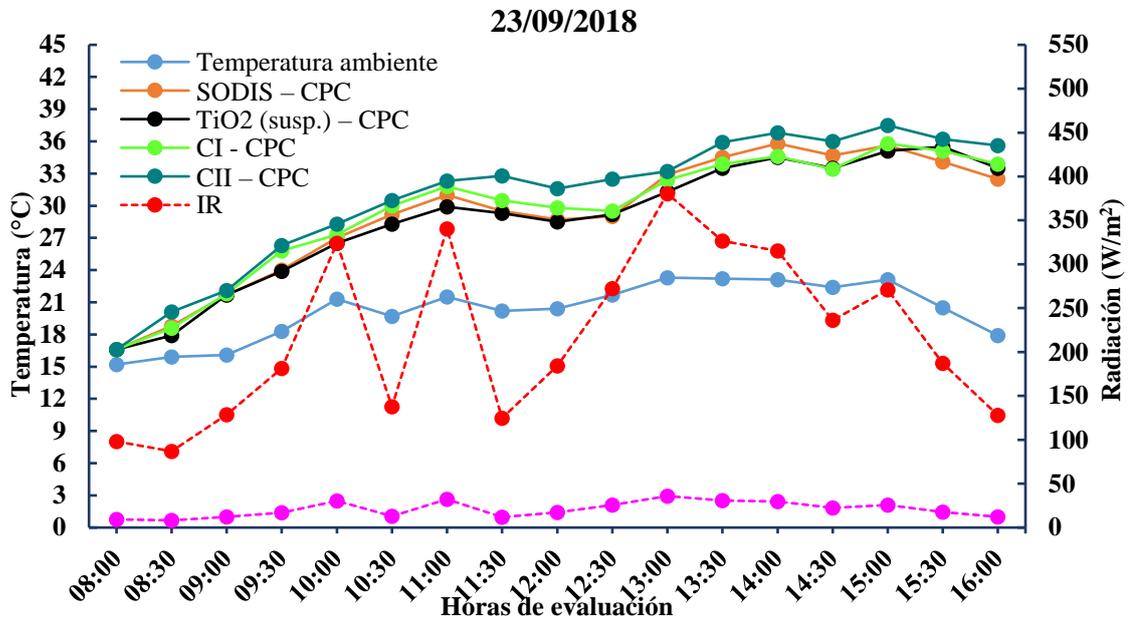
#### 3.2.2. Radiación y temperatura

La variación de la radiación solar durante las 8:00 a 16 horas en los días evaluados, no superan los 1000 W/m<sup>2</sup>, sin embargo, el día 12/10/2018 ha tenido una mayor radiación entre las 11:30 y 14 horas (Figura 30).

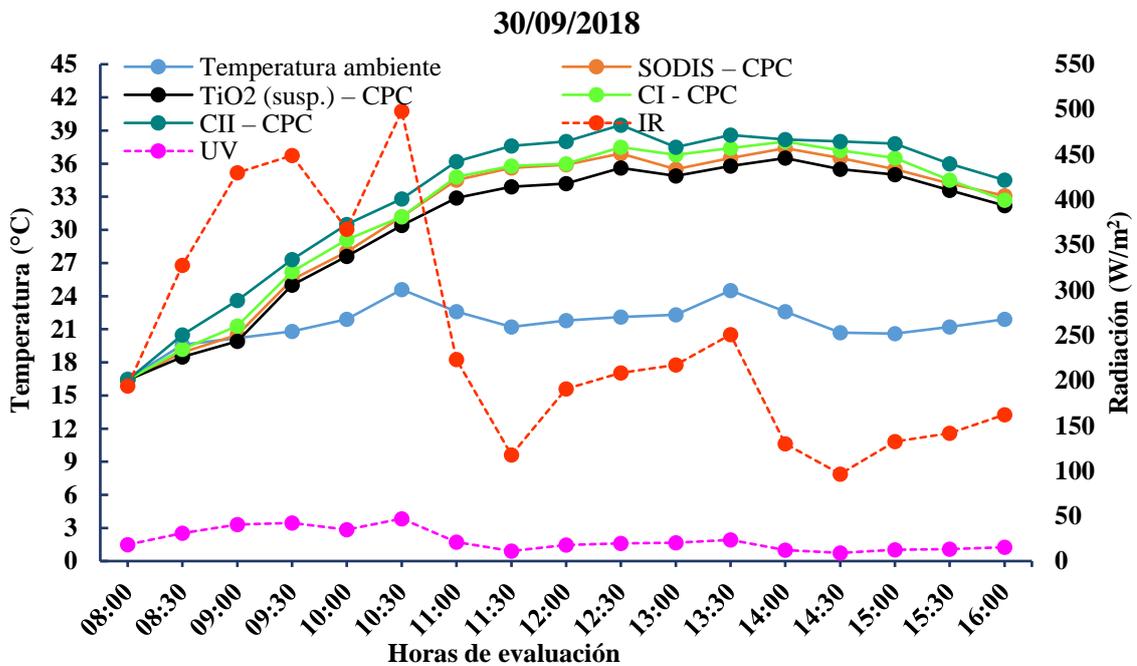


**Figura 30.** Variación de la radiación solar en los días evaluados para los tratamientos de degradación de materia orgánica de agua residual.

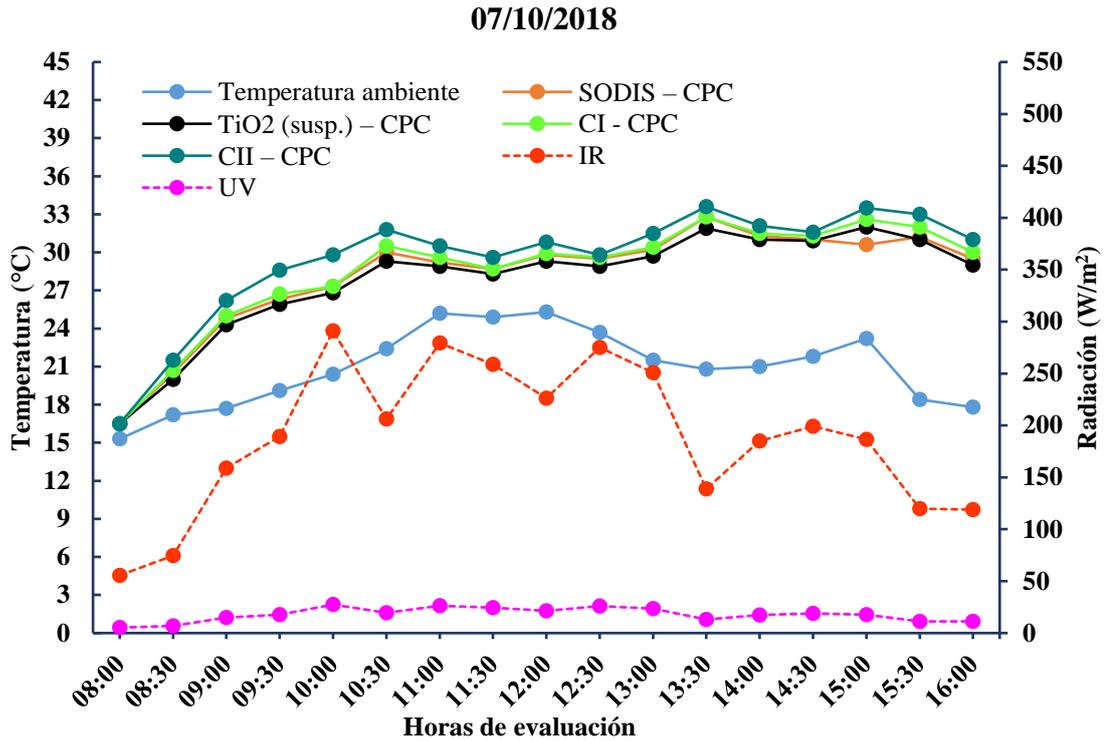
Las variaciones de la radiación infrarroja (IR) y ultravioleta (UV), así como, variación de la temperatura ganada por el agua residual por cada tratamiento aplicado se muestran en las Figura 31, 32, 33 y 34, donde el tratamiento CII-CPC muestra una mayor ganancia de temperatura del agua.



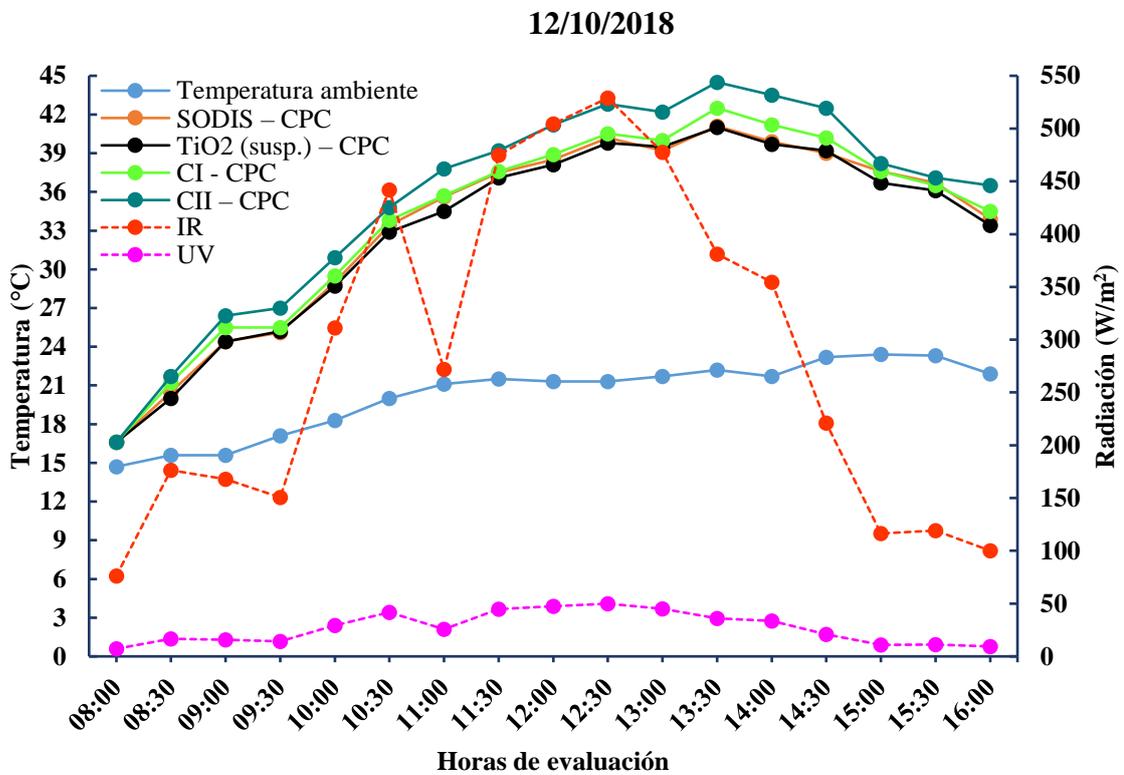
**Figura 31.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 23/09/2018.



**Figura 32.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 30/09/2018.



**Figura 33.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 07/10/2018



**Figura 34.** Variación de las temperaturas del agua para cada uno de los tratamientos, variación de la radiación IR y UV durante el experimento del 12/10/2018.

### 3.2.3. pH

El valor de pH de los tratamientos aplicados, se encuentra en rango de 6,5 y 8,5 en todos los días evaluados (Figura 35).

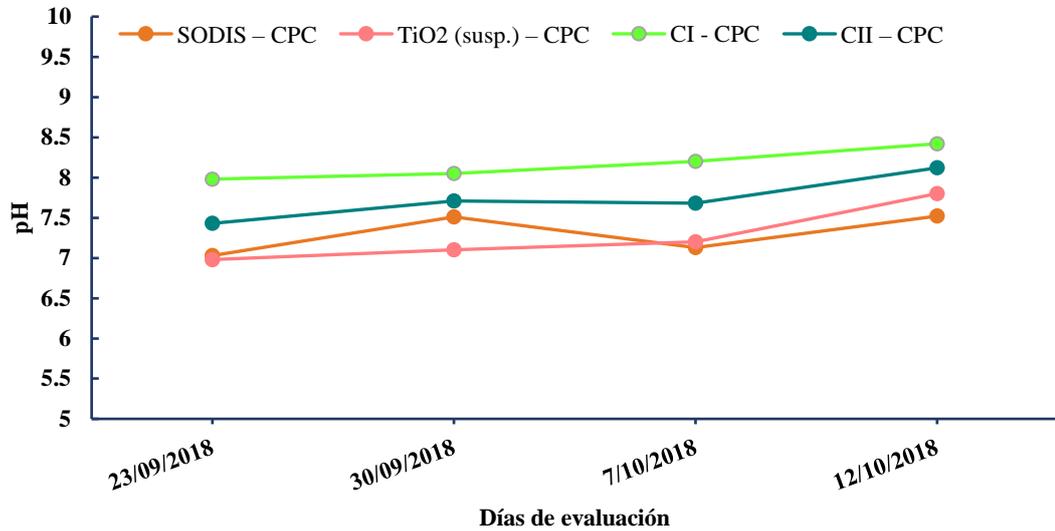


Figura 35. Variación de pH de los tratamientos en los días evaluados.

### 3.2.4. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

El rango de reducción de la DBO, por los tratamientos aplicados, se encuentra entre 24 y 31 mg/L de O<sub>2</sub> (Figura 36). Las eficiencias de remoción en todos los tratamientos superan el 91 %, de los cuales ellos tratamientos CI-CPC y SODIS-CPC, han alcanzado 93,08 %, en los días 30/09/2018 y 12/10/2018 (Tabla 9).

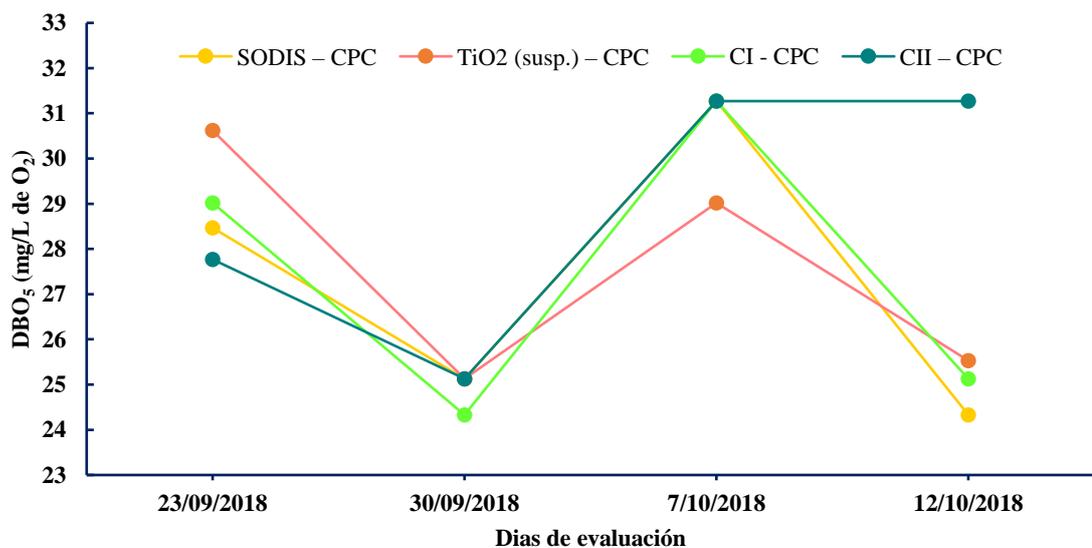
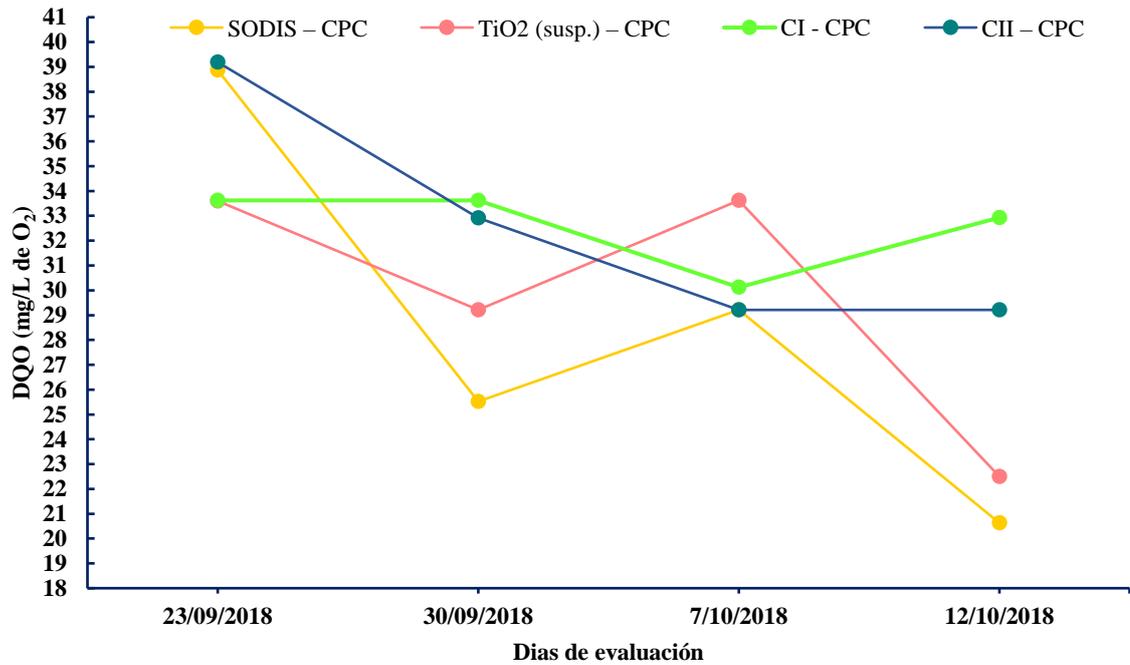


Figura 36. Demanda Biológica de Oxígeno después de la aplicación de los tratamientos en los días evaluados.

### 3.2.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La reducción de la DQO lograda por los tratamientos aplicados, se encuentra entre un rango 20 y 40 mg/L de O<sub>2</sub> (Figura 37). Las eficiencias de los tratamientos aplicados son superiores al 90%, entre los cuales, el tratamiento SODIS-CPC ha logrado un rendimiento máximo de 94,94 % en el día 12/10/2018 (Tabla 10).



**Figura 37.** Reducción de la DQO después los tratamientos aplicados en los días evaluados.

**Tabla 9.** Eficiencia de reducción de DBO por los tratamientos aplicados según los días de evaluación.

Fecha de experimento (dd/mm/aa)	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )			Tratamientos															
					SODIS – CPC			TiO2 (susp.) – CPC			CI - CPC			CII – CPC						
		Total	IR	UV	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DBO <sub>5</sub> (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η
23/09/2018	23.3	718	381	36	7,03	35.8	28,47	91.90	6,98	35.5	30,62	91.29	7,98	35.8	29,02	91.74	7,43	37.5	27,77	92.1
30/09/2018	24.6	940	498	47	7,51	37.4	25,13	92.85	7,1	36.5	25,13	92.85	8,05	38.0	24,33	93.08	7,71	39.5	25,13	92.85
07/10/2018	25.3	549	291	27	7,13	32.8	31,27	91.10	7,2	32.0	29,02	91.74	8,20	32.8	31,27	91.10	7,68	33.6	31,27	91.10
12/10/2018	23.4	998	529	50	7,52	41.1	24,33	93.08	7,8	41.0	25,53	92.74	8,42	42.5	25,13	92.85	8,12	44.5	31,27	91.10

**Tabla 10.** Eficiencia de reducción de DBO por los tratamientos aplicados según los días de evaluación.

Fecha de experimento (dd/mm/aa)	Tamb. Máx (°C)	Radiación (W/m <sup>2</sup> )			Tratamientos															
					SODIS – CPC			TiO2 (susp.) – CPC			CI - CPC			CII – CPC						
		Total	IR	UV	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DQO (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DQO (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DQO (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η	pH	T H <sub>2</sub> O Máx (°C)	DQO (mg/L de O <sub>2</sub> )	% η
23/09/2018	23.3	718	381	36	7,03	35.8	38,87	90.47	6,98	35.5	33,6	91.76	7,98	35.8	33,62	91.76	7,43	37.5	39,19	90.39
30/09/2018	24.6	940	498	47	7,51	37.4	25,52	93.75	7,1	36.5	29,21	92.84	8,05	38.0	33,62	91.76	7,71	39.5	32,92	91.93
07/10/2018	25.3	549	291	27	7,13	32.8	29,21	92.84	7,2	32.0	33,62	91.76	8,20	32.8	30,12	92.62	7,68	33.6	29,21	92.84
12/10/2018	23.4	998	529	50	7,52	41.1	20,63	94.94	7,8	41.0	22,5	94.49	8,42	42.5	32,92	91.93	8,12	44.5	29,21	92.84

#### IV. DISCUSIÓN

Los parámetros microbiológicos del agua de pozo que se utilizó en este estudio no cumplen con los parámetros del agua para consumo humano, ya que en el DS N° 031-2010-SA se establece que el límite máximo permisible de coliformes totales, fecales y *E. coli* tiene que ser menor a 1,8 NMP/100 mL y el pH del agua debe estar en un rango de 6,5 a 8,5. A pesar de ello, el agua del pozo es utilizada por una parte de la población del Asentamiento Humano 16 de Octubre, ya que no tienen fuentes de agua cercanas.

En los días que se realizó la evaluación de los diferentes tratamientos, la radiación solar no superó los 1000 W/m<sup>2</sup>, esto debido a que la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre depende de factores como ubicación, hora del día, declinación e inclinación de la superficie de la Tierra, clima, entre otros (Colmenares, 2019). La cantidad de radiación influye en el proceso de desinfección, ya que, la radiación infrarroja (representa el 53% de la radiación solar) es la responsable del incremento de la temperatura del agua, mientras que, la radiación ultravioleta (5% de la radiación solar) inhibe a los microorganismos presentes en el agua (Castro-Alfárez, Polo-López, Marugán, & Fernández-Ibáñez, 2017).

El tratamiento SODIS-CPC, en la presente investigación ha alcanzado un rendimiento de 50,0 % a 85,83 % en inactivación de coliformes fecales, 98 - 99 % en coliformes fecales y 36,6 % a 81,81 % en inactivación de *E. coli*, debido a que en los procesos de desinfección del agua en ausencia de fotocatalizador, el líquido es a menudo transparente a la luz (muy bajo coeficiente de extinción). La muerte bacteriana durante la exposición solar de botellas transparentes llenas de agua contaminada se atribuye al efecto combinado de: i) los fotones UV absorbidos por las bacterias y que producen especies de oxígeno reactivo intracelular que inducen daños oxidativos, y ii) un ligero aumento de la temperatura del agua (comúnmente entre 25 °C y 50 °C) que acelera el proceso de inactivación bacteriana (Castro-Alfárez *et al.*, 2017).

El tratamiento SODIS-CPC, los efectos sinérgicos de la radiación y la temperatura podrían variar en relación con las condiciones meteorológicas. Según Amin & Han (2009), el agua en los reactores de PET sobre un soporte de papel de aluminio desinfectó completamente el agua en condiciones climáticas fuertes (temperatura máxima del agua 48 °C), eliminando todos los microorganismos. Marques, Gomes, Fonseca, Parreira, & Santos, (2013), experimentaron con muestras de agua de río

expuestas a 3 h de radiación solar en días de clima moderado y obtuvieron un 99,9% de inactivación de coliformes fecales (*E. coli*) cuando el agua alcanzó más de 50 °C (un promedio de 6 h picos de radiación – 685,6 W/m<sup>2</sup>), pero observaron inactivación de coliformes fecales en reactores expuestos a la radiación solar en las mismas condiciones climáticas en techos de asbesto. Del mismo modo, el proceso SODIS con los concentradores solares utilizados por Cavallini, Lira, Araujo, & Lima, (2018), en la región Sur del Estado de Tocantins – Brasil tuvo una eficiencia de 100 % de desinfección de *E. coli* y coliformes totales en agua de pozo, en un tiempo de 4 a 6 horas con una exposición de radiación solar 15960- 71646 Whm<sup>-2</sup> (en rango 312 – 365 nm de longitud de onda).

La radiación UV recibida en tratamiento TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC, es menor a los 50 W/m<sup>2</sup>, lo cual ha sido un factor determinante en el bajo rendimiento del sistema comparado con los otros estudios, debido a que, las longitudes de onda más destructivas para la vida microbiana están cerca del espectro UV-A (320–400 nm), mientras que la banda espectral de 400 a 490 nm es la menos dañina. Del mismo modo, las diferencias en las tasas de inactivación bacteriana a temperaturas entre 12 y 40 °C son insignificantes, pero la acción bactericida se acelera al doble cuando la temperatura aumenta a 50 °C, probablemente debido al efecto sinérgico entre la radiación y la temperatura (Blanco *et al.*, 2009).

Por otro lado, en la fotocatalisis de TiO<sub>2</sub> hay fuertes gradientes de la irradiación a través de la profundidad del líquido penetrada por la luz debido a los altos coeficientes de extinción de las suspensiones de TiO<sub>2</sub>, por lo tanto, la eficiencia del proceso de desinfección también se rige por la carga del fotocatalizador y la geometría del reactor (Rizzo *et al.*, 2014). Los factores mencionados anteriormente, han influido en el rendimiento del tratamiento TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC, ya que, las partículas en suspensión obstruían el paso de los rayos solares, lo cual limitaban el efecto combinado de la radiación UV y la fotocatalisis, ya que el grosor óptico de la suspensión acuosa en el reactor es el parámetro que determina el uso óptimo de la energía del fotón y afecta la tasa de desinfección (Castro-Alfárez, Inmaculada Polo-López, Marugán, & Fernández-Ibáñez, 2018).

Existe un amplio consenso que la inmovilización de TiO<sub>2</sub> en un sólido requiere más tiempo de contacto que los sistemas de suspensión. Sin embargo, la ausencia de una

necesidad de separar el fotocatalizador es la ventaja de los sistemas inmovilizados, lo que aumenta su simplicidad en el diseño y el funcionamiento (Alrousan, Polo-López, Dunlop, Fernández-Ibáñez, & Byrne, 2012). Esto ha sido demostrado, en esta investigación, los tratamientos CI – CPC y CII – CPC, los cuales han logrado rendimiento elevados de inactivación de coliformes totales, fecales y la eliminación completa de *E. coli*, pero, en términos de pH, el agua tratada supera el rango óptimo (6,5 – 8,5) para el consumo humano, este valor de pH se debe al concreto ya al tener contacto con el agua, se desprenden los compuestos alcalinos del cemento. Sin embargo, los sistemas de fotocatalizadores inmovilizados (como se informa aquí) supera la necesidad de recuperación del catalizador después del tratamiento.

El efecto de desinfección de estos catalizadores impregnados por  $\text{TiO}_2$  es debido a que la radiación UV con longitud de onda (320 – 400 nm), realiza la foto-excitación de  $\text{TiO}_2$ , propiciando reacciones primarias de oxidación o reducción electroquímica que involucran la transferencia de electrones del semiconductor fotoexcitado. Estas reacciones redox, en presencia de agua y oxígeno, pueden resultar en la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que pueden atacar e inactivar microorganismos (Mani, Kanjur, Bright Singh, & Reed, 2006). El ROS incluyen el radical hidroxilo ( $\text{HO}^\bullet$ ), que ha sido sugerido ser las especies primarias responsables de la inactivación de microorganismos, anión radical superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ), hidroxilo radical ( $\text{HO}_2^\bullet$ ) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Vonberg *et al.*, 2014). El ROS ataca indiscriminadamente y, por lo tanto, la aparición de resistencia antimicrobiana a la fotocatálisis es poco probable; sin embargo, un tratamiento fotocatalítico debe ser adecuado para evitar la reparación y el recrecimiento de los organismos objetivo (Byrne *et al.*, 2015; Laxma Reddy, Kavitha, Kumar Reddy, & Kim, 2017).

Por otro lado, el efecto de la radiación UV sobre los microorganismos, es debido a que, cuando el ADN se irradia con luz UV, parte de esa luz es absorbida por los anillos de pirimidina de las bases de timina y citosina del ADN. Esta energía puede conducir a la formación de nuevos enlaces entre bases de pirimidina adyacentes, formando dímeros de pirimidina (pares conectados por enlaces covalentes). Incluyen dímeros de ciclobutano pirimidina (CPD) y 6-4 fotoproductos, de los cuales estos últimos pueden fotoisomerizarse para formar isómeros Dewar. Los dímeros de pirimidina son

problemáticos por varias razones. Impiden el emparejamiento de bases con las purinas complementarias en la otra cadena de ADN, que cambia la forma de la molécula de ADN en el área del dímero (Referencia). Esto, a su vez, dificulta que las enzimas polimerasas que copian el ADN se muevan a través de la región del dímero. Como el dímero no está formando pares de bases, la polimerasa no sabe qué nucleótido agregar a la nueva cadena de ADN cuando se encuentra con el dímero. En algunos casos, la polimerasa se salta el dímero, dando como resultado la eliminación de dos bases de la cadena de ADN (McGuigan *et al.*, 2012).

Por otro lado, la eficiencia de la fotocatalisis de  $\text{TiO}_2$  en tratamiento de aguas residuales depende de las características en la fuente, la carga del fotocatalizador, el campo de radiación. Las muestras iniciales de la quebrada de Santa Lucía superan los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio del Ambiente, ya que, no reciben tratamiento alguno. Los resultados de degradación de materia orgánica, lograda por los tratamientos evaluados, son eficientes porque los valores obtenidos de DBO y DQO se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles para los efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, 100 mg/L de  $\text{O}_2$  DBO y 200 mg/L de  $\text{O}_2$  DQO, establecido por el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM.

Entre los cuatro tratamientos evaluados, se destaca el tratamiento CI-CPC y CII-CPC, ya que superan limitaciones como, la pérdida del  $\text{TiO}_2$  (que presenta el tratamiento  $\text{TiO}_2$  (susp.) – CPC) y la degradación de contaminantes emergentes (dificultad presentado por el SODIS – CPC), aunque esta última no ha sido evaluada en esta investigación, pero de estudios anteriores se conoce el amplio rango de mineralización de contaminantes por la fotocatalisis con  $\text{TiO}_2$ . Las limitaciones de los sistemas con los catalizadores CI y CII son: (i) el tiempo de contacto (ii) el volumen total de agua a tratar; (iii) las características físico-químicas del agua; (iv) el envejecimiento o la durabilidad del recubrimiento; (v) ensuciamiento del foto-catalizador. Por lo tanto, en investigaciones futuras tienen que ser evaluados bajo estos parámetros.

Además, los indicadores de rendimiento de desinfección del agua de pozo, en esta investigación, están basados en la inactivación de coliformes totales, fecales y *E. coli*. Sin embargo, estos indicadores no proporcionan información sobre la incidencia y el comportamiento de los virus y los protozoos (Keane *et al.*, 2014).

## V. CONCLUSIONES

- Los parámetros microbiológicos evaluados del agua de pozo del Asentamiento Humano de 16 de octubre superan los límites de calidad permisibles establecidos por el Ministerio de Salud para el agua de consumo humano. La concentración de materia orgánica de la quebrada Santa Lucía, analizados en este estudio, causa alteraciones en el entorno acuático de dicha quebrada ya que las aguas residuales son vertidas directamente al ambiente, sin tratamiento alguno.
- El sistema tratamiento compuesto por el CPC 115 X (factor de concentración solar de 1,15 y un ángulo de aceptación de 30°) con superficie reflectora de plancha de acero galvanizado y receptor de botella PET de 1.5 L, ubicado en posición norte-sur levantado la parte sur 30 ° para compensar la curvatura terrestre, y radiación solar entre los 60 y 1000 W/m<sup>2</sup>, en la ciudad de Chachapoyas ha logrado tener las eficiencias máximas con el tratamiento SODIS-CPC y el tratamiento TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC, de 88,83% de inactivación de coliformes totales, 99,88 % de eliminación de coliformes fecales; así mismo, el CI - CPC (catalizador de concreto con porosidad de 13,2 %), su eficiencia fue de 64,58 % de coliformes totales, 99.67 % de inactivación de coliformes fecales y 99,99 % de *E. coli*, por último, con el tratamiento CII – CPC, tuvo una eficiencia de 99,99% en todos los parámetros mencionados.
- La eficiencia máxima de degradación de materia orgánica de agua residual de los tratamientos evaluados son: SODIS – CPC y CI – CPC han removido un 93,08 % DBO, TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC y CII – CPC han tenido un remoción del 92,85 %, mientras que, la eficiencia de remoción de DQO para el tratamiento SODIS – CPC es de 94,94%; TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC es de 94,49 % CI – CPC es de 92,62 % y CII – CPC es de 92,84 %.
- El sistema propuesto, es de bajo costo y puede operar en cualquier lugar del mundo para el tratamiento de agua; sin embargo, hay que tener en cuenta que la tasa de desinfección de coliformes totales, fecales y *E. coli* en el agua de pozo y degradación de materia orgánica depende de la intensidad de la radiación incidente, el tiempo de exposición, concentración de TiO<sub>2</sub> y la geometría del reactor.

## VI. RECOMENDACIONES

Para mejorar la eficiencia del sistema propuesto en la presente investigación, se recomienda:

- Construir un colector parabólico compuesto con superficie altamente reflectante (acero inoxidable de alto brillo) para aprovechar mejor la radiación solar.
- Emplear otros tipos de soporte para el catalizador.
- Realizar la impregnación del  $\text{TiO}_2$  a través de los métodos sol-gel, deposición física de vapor o deposición química de vapor.
- Utilizar materiales que no contengan protección UV como fotorreactores.
- Realizar la evaluación de eficiencia del tratamiento considerando la variable tiempo.
- Evaluar todos los parámetros que se exigen en la normativa para agua potable y aguas residuales.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, A., Carpio, E. A., Rodríguez, J., & Manzano, M. A. (2012). Disinfection of Natural Water by Solar Photocatalysis Using Immobilized TiO<sub>2</sub> Devices: Efficiency in Eliminating Indicator Bacteria and Operating Life of the System. *Journal of Solar Energy Engineering*, *134*, 011008.
- Ahmed, S., Rasul, M. G., Martens, W. N., Brown, R., & Hashib, M. A. (2011). Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater: A review. *Water, Air, and Soil Pollution*, *215*, 3–29.
- Alrousan, D. M. A., Polo-López, M. I., Dunlop, P. S. M., Fernández-Ibáñez, P., & Byrne, J. A. (2012). Solar photocatalytic disinfection of water with immobilised titanium dioxide in re-circulating flow CPC reactors. *Applied Catalysis B: Environmental*, *128*, 126–134.
- Amin, M. T., & Han, M. Y. (2009). Roof-harvested rainwater for potable purposes: Application of solar collector disinfection (SOCO-DIS). *Water Research*, *43*, 5225–5235.
- Athanasekou, C. P., Likodimos, V., & Falaras, P. (2018). Recent developments of TiO<sub>2</sub> photocatalysis involving advanced oxidation and reduction reactions in water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *6*, 7386–7394.
- Blanco, J., Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Alarcón, D., Gernjak, W., & Maldonado, M. I. (2009). Review of feasible solar energy applications to water processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*, 1437–1445.
- Borges, M. E., Hernández, T., & Esparza, P. (2014). Photocatalysis as a potential tertiary treatment of urban wastewater: New photocatalytic materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *16*, 431–436.
- Borges, M. E., Sierra, M., Cuevas, E., García, R. D., & Esparza, P. (2016). Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO<sub>2</sub> loaded on a natural material for wastewater treatment. *Solar Energy*, *135*, 527–535.
- Borges, M. E., Sierra, M., Méndez-Ramos, J., Acosta-Mora, P., Ruiz-Morales, J. C., & Esparza, P. (2016). Solar degradation of contaminants in water: TiO<sub>2</sub> solar photocatalysis assisted by up-conversion luminescent materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *155*, 194–201.
- Byrne, J. A., Dunlop, P. S. M., Hamilton, J. W. J., Fernández-Ibáñez, P., Polo-López, I., Sharma, P. K., & Vennard, A. S. M. (2015). A review of heterogeneous photocatalysis for water and surface disinfection. *Molecules*, *20*, 5574–5615.
- Carpio, E., Zúñiga, P., Ponce, S., Solis, J., Rodríguez, J., & Estrada, W. (2005). Photocatalytic degradation of phenol using TiO<sub>2</sub> nanocrystals supported on activated carbon. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, *228*, 293–298.
- Castro-Alfárez, M., Inmaculada Polo-López, M., Marugán, J., & Fernández-Ibáñez, P. (2018). Validation of a solar-thermal water disinfection model for Escherichia coli inactivation in pilot scale solar reactors and real conditions. *Chemical Engineering Journal*, *331*, 831–840.

- Castro-Alfárez, M., Polo-López, M. I., Marugán, J., & Fernández-Ibáñez, P. (2017). Mechanistic modeling of UV and mild-heat synergistic effect on solar water disinfection. *Chemical Engineering Journal*, *316*, 111–120.
- Castro, A. C., Romero, C. ;, Salazar, C. ;, Centeno, O. ;, Giraldo, A. ;, Castro, C., ... Giraldo, S. A. (2011). Efecto De La Composición Química Del Agua Sobre Su Desinfección Fotocatalítica Effect of the Chemical Composition of Water on Its Photocatalytic Disinfection. *Revista U.D.C.A Actulidad & Divulgación Científica*, *14*, 117–125.
- Cavallini, G. S., Lira, D., Araujo, S., & Lima, G. F. (2018). DESINFECÇÃO DE ÁGUA DE POÇO POR RADIAÇÃO SOLAR ( SODIS ): UM ESTUDO NA REGIÃO SUL DO TOCANTINS. *Desafios*, *5*(2914).
- Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*, *44*(10), 2997–3027.
- Colmenares, J. C. (2019). Selective redox photocatalysis: Is there any chance for solar bio-refineries? *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *15*, 38–46.
- Daghrir, R., Drogui, P., & Robert, D. (2013). Modified TiO<sub>2</sub> for environmental photocatalytic applications: A review. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, *52*, 3581–3599.
- Garzón, C., & Sturzenegger, G. (2016). Los desafíos de agenda de desarrollo post-2015 para el sector de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe. Conclusiones de la Semana Mundial del Agua 2015. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 1–38.
- Guerrant, R. L., Deboer, M. D., Moore, S. R., Scharf, R. J., & Lima, A. A. M. (2013). The impoverished gut - A triple burden of diarrhoea, stunting and chronic disease. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, *10*, 220–229.
- Gutiérrez-Alfaro, S., Acevedo, A., Rodríguez, J., Carpio, E. A., & Manzano, M. A. (2015). Solar photocatalytic water disinfection of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp. and *Clostridium Perfringens* using different low-cost devices. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *91*, 2026–2037.
- INEI. (2018). Perú: Formas de acceso al Agua y Saneamiento Básico. Recuperado de [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin\\_agua\\_y\\_saneamiento.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua_y_saneamiento.pdf)
- Keane, D. A., McGuigan, K. G., Ibáñez, P. F., Polo-López, M. I., Byrne, J. A., Dunlop, P. S. M., Pillai, S. C. (2014). Solar photocatalysis for water disinfection: Materials and reactor design. *Catalysis Science and Technology*, *4*, 1211–1226.
- Lara, F., Velázquez, N., Saucedo, D., & Acuña, A. (2013). Metodología para el dimensionamiento y optimización de un concentrador lineal fresnel. *Informacion Tecnologica*, *24*, 115–128.
- Laxma Reddy, P. V., Kavitha, B., Kumar Reddy, P. A., & Kim, K. H. (2017). TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic disinfection of microbes in aqueous media: A review. *Environmental Research*, *154*, 296–303.

- Malato, S., Fernández-Ibáñez, P., Maldonado, M. I., Blanco, J., & Gernjak, W. (2009). Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. *Catalysis Today*, *147*, 1–59.
- Mani, S. K., Kanjur, R., Bright Singh, I. S., & Reed, R. H. (2006). Comparative effectiveness of solar disinfection using small-scale batch reactors with reflective, absorptive and transmissive rear surfaces. *Water Research*, *40*, 721–727.
- Marques, A. R., Gomes, F. de C. O., Fonseca, M. P. P., Parreira, J. S., & Santos, V. P. (2013). Efficiency of PET reactors in solar water disinfection for use in southeastern Brazil. *Solar Energy*, *87*, 158–167.
- McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H. J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernandez-Ibañez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, *235–236*, 29–46.
- Meierhofer, R. A., & Landolt, G. (2009). Factors supporting the sustained use of solar water disinfection – Experiences from a global promotion and dissemination programme. *Desalination*, *248*, 144–151.
- MiarAlipour, S., Friedmann, D., Scott, J., & Amal, R. (2018). TiO<sub>2</sub> /porous adsorbents: Recent advances and novel applications. *Journal of Hazardous Materials*, *341*, 404–423.
- Notton, G. (2017). *Solar Radiation for Energy Applications. Encyclopedia of Sustainable Technologies* 4, 339-356.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Agua. Recuperado de <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Orha, C., Pode, R., Manea, F., Lazau, C., & Bandas, C. (2017). Titanium dioxide-modified activated carbon for advanced drinking water treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, *108*, 26–33.
- Pichel, N., Vivar, M., & Fuentes, M. (2019). The problem of drinking water access: A review of disinfection technologies with an emphasis on solar treatment methods. *Chemosphere*, *218*, 1014–1030.
- Polo-López, M. I., Fernández-Ibáñez, P., Ubomba-Jaswa, E., Navntoft, C., García-Fernández, I., Dunlop, P. S. M., McGuigan, K. G. (2011). Elimination of water pathogens with solar radiation using an automated sequential batch CPC reactor. *Journal of Hazardous Materials*, *196*, 16–21.
- Ponce, S., Carpio, E., Venero, J., Estrada, W., Rodríguez, J., Reche, C., & Candal, R. J. (2009). Titanium Dioxide onto Polyethylene for Water Decontamination. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, *12*, 81–86.
- Qu, X., Alvarez, P. J. J., & Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Res*, *47*(12), 3931–3946.
- Rizzo, L., Della Sala, A., Fiorentino, A., & Li Puma, G. (2014). Disinfection of urban wastewater by solar driven and UV lamp - TiO<sub>2</sub> photocatalysis: Effect on a multi drug resistant Escherichia coli strain. *Water Research*, *53*, 145–152.
- Salgado-Tránsito, I., Jiménez-González, A. E., Ramón-García, M. L., Pineda-Arellano, C. A., & Estrada-Gasca, C. A. (2015). Design of a novel CPC collector for the

- photodegradation of carbaryl pesticides as a function of the solar concentration ratio. *Solar Energy*, 115, 537–551.
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301–310.
- Shen, S., Burton, M., Jobson, B., & Haselbach, L. (2012). Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. *Construction and Building Materials*, 35, 874–883.
- Spasiano, D., Marotta, R., Malato, S., Fernandez-Ibañez, P., & Di Somma, I. (2015). Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach. *Applied Catalysis B: Environmental*, 170–171, 90–123.
- Srikanth, B., Goutham, R., Badri Narayan, R., Ramprasath, A., Gopinath, K. P., & Sankaranarayanan, A. R. (2017). Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment. *Journal of Environmental Management*, 200, 60–78.
- Threrujirapapong, T., Khanitchaidecha, W., & Nakaruk, A. (2017). Treatment of high organic carbon industrial wastewater using photocatalysis process. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 8, 163–168.
- 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.
- Vonberg, D., Vanderborght, J., Cremer, N., Pütz, T., Herbst, M., & Vereecken, H. (2014). 20 years of long-term atrazine monitoring in a shallow aquifer in western Germany. *Water Research*, 50, 294–306.
- Xing, Z., Zhang, J., Cui, J., Yin, J., Zhao, T., Kuang, J., Zhou, W. (2018). Recent advances in floating TiO<sub>2</sub>-based photocatalysts for environmental application. *Applied Catalysis B: Environmental*. 225, 452-467
- Yahya, N., Aziz, F., Jamaludin, N. A., A. Mutalib, M., Ismail, A. F., W. Salleh, W. N.,A. Ludin, N. (2018). A review of integrated photocatalyst adsorbents for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.6.7411-7425
- Zhang, Y., Sivakumar, M., Yang, S., Enever, K., & Ramezani-pour, M. (2018). Application of solar energy in water treatment processes: A review. *Desalination*, 428, 116–145.

## ANEXOS

### Anexo1: Radiación solar en los días evaluados

<b>9/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	195	103	82	10
08:30	426	226	179	21
09:00	566	300	238	28
09:30	668	354	281	33
10:00	680	360	286	34
10:30	294	156	123	15
11:00	780	413	328	39
11:30	553	293	232	28
12:00	440	233	185	22
12:30	489	259	205	24
13:00	983	521	413	49
13:30	863	457	362	43
14:00	569	302	239	28
14:30	601	319	252	30
15:00	691	366	290	35
15:30	662	351	278	33
16:00	537	285	226	27

<b>12/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	287	152	121	14
08:30	228	121	96	11
09:00	437	232	184	22
09:30	390	207	164	20
10:00	513	272	215	26
10:30	341	181	143	17
11:00	328	174	138	16
11:30	312	165	131	16
12:00	405	215	170	20
12:30	926	491	389	46
13:00	1009	535	424	50
13:30	861	456	362	43
14:00	851	451	357	43
14:30	893	473	375	45
15:00	770	408	323	39
15:30	604	320	254	30
16:00	212	112	89	11

<b>16/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	372	197	156	19
08:30	302	160	127	15
09:00	478	253	201	24
09:30	677	359	284	34
10:00	543	288	228	27
10:30	527	279	221	26
11:00	387	205	163	19
11:30	473	251	199	24
12:00	488	259	205	24
12:30	413	219	173	21
13:00	429	227	180	21
13:30	458	243	192	23
14:00	569	302	239	28
14:30	883	468	371	44
15:00	365	193	153	18
15:30	152	81	64	8
16:00	60	32	25	3

<b>16/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	293	155	123	15
08:30	389	206	163	19
09:00	441	234	185	22
09:30	725	384	305	36
10:00	829	439	348	41
10:30	735	390	309	37
11:00	316	167	133	16
11:30	485	257	204	24
12:00	273	145	115	14
12:30	491	260	206	25
13:00	235	125	99	12
13:30	465	246	195	23
14:00	263	139	110	13
14:30	455	241	191	23
15:00	739	392	310	37
15:30	340	180	143	17
16:00	478	253	201	24

<b>23/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	185	98	78	9
08:30	164	87	69	8
09:00	243	129	102	12
09:30	342	181	144	17
10:00	611	324	257	31
10:30	260	138	109	13
11:00	642	340	270	32
11:30	235	125	99	12
12:00	348	184	146	17
12:30	514	272	216	26
13:00	718	381	302	36
13:30	616	326	259	31
14:00	595	315	250	30
14:30	446	236	187	22
15:00	511	271	215	26
15:30	353	187	148	18
16:00	241	128	101	12

<b>30/09/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	366	194	154	18
08:30	618	328	260	31
09:00	811	430	341	41
09:30	847	449	356	42
10:00	693	367	291	35
10:30	940	498	395	47
11:00	421	223	177	21
11:30	222	118	93	11
12:00	360	191	151	18
12:30	393	208	165	20
13:00	410	217	172	21
13:30	473	251	199	24
14:00	245	130	103	12
14:30	182	96	76	9
15:00	250	133	105	13
15:30	267	142	112	13
16:00	306	162	129	15

<b>07/10/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	105	56	44	5
08:30	141	75	59	7
09:00	300	159	126	15
09:30	357	189	150	18
10:00	549	291	231	27
10:30	389	206	163	19
11:00	527	279	221	26
11:30	488	259	205	24
12:00	427	226	179	21
12:30	519	275	218	26
13:00	473	251	199	24
13:30	262	139	110	13
14:00	349	185	147	17
14:30	376	199	158	19
15:00	352	187	148	18
15:30	226	120	95	11
16:00	224	119	94	11

<b>12/10/2018</b>				
<b>Hora</b>	<b>Radiación</b>	<b>IR</b>	<b>VIS</b>	<b>UV</b>
08:00	144	76	60	7
08:30	333	176	140	17
09:00	317	168	133	16
09:30	284	151	119	14
10:00	587	311	247	29
10:30	834	442	350	42
11:00	513	272	215	26
11:30	896	475	376	45
12:00	952	505	400	48
12:30	998	529	419	50
13:00	901	478	378	45
13:30	719	381	302	36
14:00	669	355	281	33
14:30	417	221	175	21
15:00	220	117	92	11
15:30	225	119	95	11
16:00	189	100	79	9

**Anexo 2: Temperaturas medidas durante los experimentos**

<b>07/09/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	12.7	16.6	16.6	16.6	16.6
08:30	15.6	19.9	20.0	19.8	20.1
09:00	18.9	21.7	21.7	21.8	22.1
09:30	21.1	25.0	25.3	25.8	26.3
10:00	21.8	28.2	28.5	28.2	29.3
10:30	20.8	30.1	29.6	31.1	32.4
11:00	22.0	32.1	32.5	32.9	33.3
11:30	21.4	29.3	29.3	31.4	32.8
12:00	21.2	28.2	28.5	29.8	32.5
12:30	22.1	29.0	29.2	29.5	32.5
13:00	24.3	32.9	31.9	32.4	33.2
13:30	23.7	32.5	32.0	32.2	33.0
14:00	22.8	33.2	32.6	33.0	33.5
14:30	23.5	34.7	35.2	35.4	36.5
15:00	24.3	35.6	35.6	36.5	37.2
15:30	23.4	34.1	35.5	35.1	36.2
16:00	22.8	33.2	34.1	34.1	35.6

<b>12/09/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	14.3	16.5	16.5	16.5	16.5
08:30	16.1	17.2	17.2	17.8	18.3
09:00	18.6	22.6	22.4	23.2	24.1
09:30	19.3	24.3	24.6	24.7	26.5
10:00	21.2	28.6	27.8	28.6	30.1
10:30	20.7	28.3	27.5	28.0	29.5
11:00	20.3	27.8	27.0	27.8	29.0
11:30	20.9	27.5	27.5	27.5	29.6
12:00	22.2	28.9	28.2	27.9	30.1
12:30	23.8	29.5	28.9	29.6	29.8
13:00	24.9	30.2	29.3	30.4	30.6
13:30	24.2	30.4	30.0	30.6	30.9
14:00	24.8	31.3	31.0	31.5	32.1
14:30	25.5	32.1	31.8	32.3	33.0
15:00	24.9	32.5	32.0	32.6	33.5
15:30	23.1	31.2	31.0	32.0	33.0
16:00	20.6	29.5	29.0	30.0	31.0

16/09/2018					
Hora	Temperatura ambiente	SODIS – CPC	TiO <sub>2</sub> (susp.) – CPC	CI - CPC	CII – CPC
08:00	13.7	16.4	16.4	16.4	16.4
08:30	14.1	20.8	20.1	20.7	21.1
09:00	16.2	23.2	22.8	23.5	24.3
09:30	18.9	27.1	26.8	27.3	28.0
10:00	20.1	29.5	29.0	29.8	30.5
10:30	20.4	31.2	30.4	30.9	31.8
11:00	19.8	31.9	31.0	31.5	32.8
11:30	20.6	32.6	32.0	32.8	33.1
12:00	21.8	33.0	32.6	33.3	34.5
12:30	21.2	33.8	32.9	33.9	34.9
13:00	21.3	34.5	33.9	35.1	35.9
13:30	21.6	36.5	35.8	36.9	37.5
14:00	23.4	37.4	36.5	38.0	38.2
14:30	24.2	37.8	37.2	38.5	39.6
15:00	23.2	36.0	35.0	36.5	37.8
15:30	21.2	33.5	32.8	33.0	35.0
16:00	18.4	30.0	29.9	31.0	33.5

19/09/2018					
Hora	Temperatura ambiente	SODIS – CPC	TiO <sub>2</sub> (susp.) – CPC	CI - CPC	CII – CPC
08:00	15.8	16.6	16.6	16.6	16.6
08:30	16.9	21.1	21.2	21.2	21.7
09:00	17.4	25.4	25.6	25.8	28.0
09:30	19.1	30.4	30.1	30.6	32.5
10:00	20.9	31.3	30.7	31.3	33.1
10:30	22.5	33.6	33.4	35.1	37.5
11:00	21.6	33.6	33.5	36.7	38.0
11:30	22.9	32.3	32.3	32.3	34.4
12:00	21.9	29.9	30.6	30.9	32.1
12:30	23.0	29.6	29.1	29.6	31.4
13:00	22.0	28.3	28.1	28.8	30.6
13:30	23.6	27.8	27.4	28.8	30.1
14:00	23.4	30.3	28.9	30.3	31.4
14:30	23.9	35.2	33.7	34.5	36.1
15:00	25.1	37.6	35.0	37.6	40.8
15:30	23.5	37.8	36.1	38.5	40.9
16:00	24.2	35.5	34.2	34.5	36.5

<b>23/09/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	15.2	16.6	16.6	16.6	16.6
08:30	15.9	18.8	17.9	18.6	20.1
09:00	16.1	21.7	21.7	21.8	22.1
09:30	18.3	24.0	23.9	25.8	26.3
10:00	21.3	27.0	26.5	27.3	28.3
10:30	19.7	29.2	28.3	30.0	30.5
11:00	21.5	31.0	29.9	31.8	32.3
11:30	20.2	29.5	29.3	30.5	32.8
12:00	20.4	28.7	28.5	29.8	31.6
12:30	21.7	29.0	29.2	29.5	32.5
13:00	23.3	32.9	31.3	32.4	33.2
13:30	23.2	34.5	33.5	33.9	35.9
14:00	23.1	35.8	34.5	34.6	36.8
14:30	22.4	34.7	33.5	33.4	36.0
15:00	23.1	35.6	35.1	35.8	37.5
15:30	20.5	34.1	35.5	35.1	36.2
16:00	17.9	32.5	33.5	33.9	35.6

<b>30/09/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	16.5	16.4	16.4	16.4	16.4
08:30	19.6	18.9	18.5	19.2	20.5
09:00	20.2	20.5	19.9	21.3	23.6
09:30	20.8	25.5	25.0	26.2	27.3
10:00	21.9	28.0	27.6	29.1	30.5
10:30	24.6	31.2	30.4	31.2	32.8
11:00	22.6	34.5	32.9	34.8	36.2
11:30	21.2	35.6	33.9	35.8	37.6
12:00	21.8	35.9	34.2	36.0	38.0
12:30	22.1	36.9	35.6	37.5	39.5
13:00	22.3	35.5	34.9	36.8	37.5
13:30	24.5	36.5	35.8	37.4	38.6
14:00	22.6	37.4	36.5	38.0	38.2
14:30	20.7	36.5	35.5	37.2	38.0
15:00	20.6	35.5	35.0	36.5	37.8
15:30	21.2	34.2	33.6	34.5	36.0
16:00	21.9	33.1	32.2	32.7	34.5

<b>7/10/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	15.3	16.5	16.5	16.5	16.5
08:30	17.2	20.5	20.0	20.7	21.5
09:00	17.7	24.8	24.3	25.0	26.2
09:30	19.1	26.3	25.9	26.7	28.6
10:00	20.4	27.3	26.8	27.3	29.8
10:30	22.4	30.0	29.3	30.5	31.8
11:00	25.2	29.2	28.9	29.6	30.5
11:30	24.9	28.7	28.3	28.7	29.6
12:00	25.3	29.8	29.3	29.9	30.8
12:30	23.7	29.5	28.9	29.6	29.8
13:00	21.5	30.2	29.7	30.4	31.5
13:30	20.8	32.8	31.9	32.8	33.6
14:00	21	31.3	31.0	31.5	32.1
14:30	21.8	31.0	30.9	31.3	31.6
15:00	23.2	30.6	32.0	32.6	33.5
15:30	18.4	31.2	31.0	32.0	33.0
16:00	17.8	29.5	29.0	30.0	31.0

<b>12/10/2018</b>					
<b>Hora</b>	<b>Temperatura ambiente</b>	<b>SODIS – CPC</b>	<b>TiO<sub>2</sub> (susp.) – CPC</b>	<b>CI - CPC</b>	<b>CII – CPC</b>
08:00	14.7	16.6	16.6	16.6	16.6
08:30	15.6	20.5	20.0	21.2	21.7
09:00	15.6	24.4	24.4	25.5	26.4
09:30	17.1	25.1	25.2	25.5	27.0
10:00	18.3	29.0	28.7	29.5	30.9
10:30	20	33.4	32.9	33.8	34.8
11:00	21.1	35.6	34.5	35.7	37.8
11:30	21.5	37.5	37.1	37.6	39.2
12:00	21.3	38.5	38.1	38.9	41.2
12:30	21.3	40.2	39.8	40.5	42.8
13:00	21.7	39.2	39.5	40.0	42.2
13:30	22.2	41.1	41.0	42.5	44.5
14:00	21.7	39.9	39.7	41.2	43.5
14:30	23.2	39.0	39.2	40.2	42.5
15:00	23.4	37.6	36.7	37.6	38.2
15:30	23.3	36.7	36.1	36.5	37.1
16:00	21.9	33.9	33.4	34.5	36.5