



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 20 de marzo de 2024

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

MARIA CAMILA SAENZ CARDOZO, con C.C. No. 1003951997,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

títulado FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL USO DE LA RADIACIÓN UV-C COMO MÉTODO
DE INACTIVACIÓN BACTERIANA

presentado y aprobado en el año 2024 como requisito para optar al título de

FISICO;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, sólo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL USO DE LA RADIACIÓN UV-C COMO
MÉTODO DE INACTIVACIÓN BACTERIANA**

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
MARIA CAMILA	SAENZ CARDOZO

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CRISTANCHO FIERRO	JOSE MIGUEL

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: FISICO

FACULTAD: CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PROGRAMA O POSGRADO: FISICA

CIUDAD: NEIVA AÑO DE PRESENTACIÓN: 2024 NÚMERO DE PÁGINAS: 29

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías___ Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser *LAUREADAS* o *Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>E. coli</u>	<u>E. coli</u>	6. _____	_____
2. <u>UV-C</u>	<u>UV-C</u>	7. _____	_____
3. <u>Desinfección</u>	<u>sterilizing</u>	8. _____	_____
4. <u>Bacterias</u>	<u>Bacterium</u>	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Desde el principio de la vida, el ser humano ha tenido que convivir con los demás seres que habitan el planeta tierra, entre ellos los microorganismos, estos están tan arraigados a nuestra vida que los podemos encontrar dentro de nuestro cuerpo, por ejemplo, en el intestino haciendo parte de la biota intestinal. Sin embargo, aunque algunos traen beneficios, hay algunas cepas de microorganismos que pueden causar reacciones patógenas a los humanos lo que daña la calidad de vida. En este orden de ideas, se desarrollaron diferentes técnicas de desinfección que asegurara la integridad y salud de las personas, entre las más comúnmente usadas se puede mencionar la cloración, no obstante, el desarrollo tecnológico y diversos estudios han demostrado los efectos adversos que esta puede tener, por lo cual, en los últimos años se han realizado estudios en los que usa la radiación ultravioleta para dañar la secuencia genética de los microorganismos y de este modo esterilizar superficies y cuerpos de agua. En este trabajo se realiza una revisión de los fundamentos físicos y algunos biológicos de este tipo de microorganismos, que subyacen a este método de desinfección, además de la revisión de los artículos más actualizados hallados en la literatura que hacen uso de la radiación UV-C para inactivar microorganismos en diferentes condiciones.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

Since the beginning of life, human beings have had to coexist with other beings that inhabit planet Earth, among them microorganisms. These are so deeply rooted in our lives that we can find them inside our bodies, for example, in the intestine as part of the intestinal biota. However, although some bring benefits, there are some strains of microorganisms that can cause pathogenic reactions in humans, damaging their quality of life. In this regard, different disinfection techniques were developed to ensure the integrity and health of people, among the most used is chlorination. Nevertheless, technological development and various studies have shown the adverse effects that this method can have. Therefore, in recent years, studies have been conducted using ultraviolet radiation to damage the genetic sequence of microorganisms and thus sterilize surfaces and bodies of water. This work provides a review of the physical and some biological foundations of this type of microorganisms, which underlie this disinfection method, as well as a review of the most updated articles found in the literature that use UV-C radiation to inactivate microorganisms under different conditions.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: GONZALO EDGARDO PEDRAZA GUERRERO

Firma:

Nombre Jurado: DIANA MARIA SANCHEZ SANTOS

Firma: Diana María Sánchez Santos

Nombre Jurado: ELKIN BARREIRO ROCHA

Firma: Elkin Barreiro Rocha
1079135121

Vigilada Mineducación



UNIVERSIDAD
SURCOLOMBIANA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Física

FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL USO DE LA
RADIACIÓN UV-C COMO MÉTODO DE
INACTIVACIÓN BACTERIANA

Maria Camila Sáenz Cardozo



Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Física

Trabajo de Grado

Requisito parcial para optar por el título de física

Presentado por la estudiante:
Maria Camila Sáenz Cardozo

Director:
Jose Miguel Cristancho Fierro

Neiva, Huila
Febrero 2024

*Dedico este trabajo de grado a aquellos que han sido faro
y brújula en mi travesía académica, a todas aquellas
personas que han sido parte de mi vida y que
me han brindado su apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Deseo agradecer a mis padres por siempre estar presente en cada etapa de mi vida, incluyendo mi formación universitaria. Sus palabras de aliento y motivación han sido una fuente constante de inspiración y me han impulsado a seguir adelante.

A mis amigos, quienes me brindaron apoyo y alegrías en cada parte de mi etapa universitaria.

Al docente Dr. Jose Miguel Cristancho Fierro por su dedicación y apoyo durante la realización de este trabajo.

Y a los demás docentes del programa de física quienes me brindaron los conocimientos necesarios para mi futuro profesional.

Resumen

Desde el principio de la vida, el ser humano ha tenido que convivir con los demás seres que habitan el planeta tierra, entre ellos los microorganismos, estos están tan arraigados a nuestra vida que los podemos encontrar dentro de nuestro cuerpo, por ejemplo, en el intestino haciendo parte de la biota intestinal. Sin embargo, aunque algunos traen beneficios, hay algunas cepas de microorganismos que pueden causar reacciones patógenas a los humanos lo que daña la calidad de vida. En este orden de ideas, se desarrollaron diferentes técnicas de desinfección que asegurara la integridad y salud de las personas, entre las más comúnmente usadas se puede mencionar la cloración, no obstante, el desarrollo tecnológico y diversos estudios han demostrado los efectos adversos que esta puede tener, por lo cual, en los últimos años se han realizado estudios en los que usa la radiación ultravioleta para dañar la secuencia genética de los microorganismos y de este modo esterilizar superficies y cuerpos de agua. En este trabajo se realiza una revisión de los fundamentos físicos y algunos biológicos de este tipo de microorganismos, que subyacen a este método de desinfección, además de la revisión de los artículos más actualizados hallados en la literatura que hacen uso de la radiación UV-C para inactivar microorganismos en diferentes condiciones.

Palabras clave: radiación UV-C, Inactivación bacteriana, desinfección

Índice

Introducción	6
1. Planteamiento del problema	7
2. Justificación	7
3. Objetivos	7
4. Fundamentos físicos	8
4.1. Ondas electromagnéticas	8
4.1.1. Radiación ultravioleta	9
4.2. Principios básicos de óptica	10
4.2.1. Absorbancia	11
4.3. Dosis de Radiación	12
4.4. Fuentes de luz UV-C	14
4.4.1. Lámparas de luz ultravioleta	14
5. Fundamentos biológicos	16
5.1. Microorganismos	16
5.2. Mecanismo biológico de desinfección	17
5.3. Determinación de microorganismos	20
6. Análisis de resultados en la literatura	20
7. Conclusiones	24
Referencias	25

Índice de figuras

1. Espectro Electromagnético.	8
2. Refracción de una onda.	10
3. Ley de Beer-Lambert	12
4. Esquema de una lámpara de mercurio.	15
5. Estructura del ADN	18
6. Dimerización de Timina.	19
7. Espectro de absorción de las bases nitrogenadas.	19
8. Coliformes totales en agua cruda	22
9. <i>P. aeruginosa</i> a dos intensidades.	23

Índice de tablas

1. Algunas bacterias y sus dosis efectivas.	14
2. Artículos revisados en la literatura.	22

Introducción

Los microorganismos han coexistido con la raza humana y los animales desde el inicio de su existencia, sin embargo, a pesar de que muchos de ellos proporcionan beneficios, ya que viven en zonas como los intestinos y ayudan a procesar los alimentos, algunos pueden desencadenar reacciones patógenas en los organismos; debido a esto, es indispensable, tener a la mano métodos eficientes de desinfección, tanto de superficies como de cuerpos de agua. Existen distintas técnicas de eliminación de microorganismos que tienen grandes beneficios pero también pueden tener repercusiones en la salud humana, debido a esto, se debe estudiar todas las variables que se pueden ver involucradas, en el caso de la desinfección con UV-C se debe analizar el medio en que se encuentran los microorganismos, la potencia de irradiación, el tiempo de exposición, los microorganismos a tratar e incluso parámetros físicos del agua (cuando la desinfección se da en cuerpos de agua) como la conductividad o el pH (Acosta Castellanos et al., 2016). En los últimos años, la desinfección por UV-C ha tomado gran fuerza, debido a que permite eliminar la variable de los residuos químicos que se generan en las técnicas de desinfección usadas comúnmente, ya que su mecanismo principal de acción es el daño a la secuencia genética de los microorganismos, en especial las bacterias, impidiéndoles de este modo su replicación y llevando, en algunos, casos a la muerte celular. Este documento tiene como objetivo analizar los resultados de estudios de inactivación de microorganismos mediante radiación con luz ultravioleta que se encuentren asequibles mediante el motor de búsqueda “Scholar Google”, para de esta manera determinar la efectividad del uso de este método de desinfección y además, estudiar y dar aplicación al fundamento físico detrás este.

1. Planteamiento del problema

En la actualidad se conocen los alcances patógenos que pueden tener los virus y bacterias, por lo cual es muy importante la esterilización o limpieza de superficies, materiales o fuentes hídricas para evitar la propagación de microorganismos. Debido a esto se comenzaron a implementar nuevas formas de desinfección que garantizaran el mínimo riesgo de contagio, una de ellas fue el uso de la radiación ultravioleta, lo cual trajo consigo estudios que mostraban la efectividad de este método en la disminución de la concentración de bacterias patógenas en los medios irradiados (Cristiani et al, 2019; Bernedo et al, 2020). Por lo anterior, este trabajo de grado busca recopilar toda la información necesaria que se requiere para lograr un entendimiento adecuado y completo de la inactivación bacteriana teniendo en cuenta el punto de vista físico, enfocándose principalmente en responder a la pregunta: ¿Cuáles son los fundamentos físicos que se deben tener en cuenta a la hora de trabajar con inactivación por medio luz UV-C?

2. Justificación

El uso de lámparas que emiten luz con longitud de onda dentro del espectro ultravioleta se ha vuelto común en diferentes establecimientos como hospitales, supermercados, baños, entre otros; sin embargo, a pesar del uso frecuente que se suele dar a esta tecnología se desconocen los aspectos físicos que la rigen. En la literatura se encuentran gran número de artículos que demuestran el daño al ADN que sufren las bacterias sometidas a radiación ultravioleta C, los cuales hacen énfasis en los fundamentos biológicos que rigen el fenómeno, dejando de lado o mencionando superficialmente los aspectos físicos. Debido a lo mencionado anteriormente, es fundamental que exista un documento que recopile la información necesaria para entender el fenómeno físico que envuelve el uso de la radiación UV-C en la inactivación bacteriana.

3. Objetivos

Objetivo General

Reconocer la eficacia del método de desinfección con radiación UV-C mediante la recopilación de artículos que se enmarquen en el uso y análisis de esta técnica y presentar los fundamentos físicos detrás de esta.

Objetivos específicos

- Recopilar artículos que se encuentren en la literatura que usen la radiación ultravioleta como método de inactivación bacteriana.
- Presentar los aspectos físicos que fundamentan la radiación ultravioleta y su uso como método de desinfección.

4. Fundamentos físicos

4.1. Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética (EM) es una propagación de energía. Se da por la interacción entre un campo eléctrico y uno magnético y se transmite de forma transversal, o, de forma equivalente, también se pueden producir por el movimiento de cargas. Estas ondas tienen características como la frecuencia (ω), la longitud de onda (λ), el periodo (T) y por supuesto, la energía (E). “La radiación electromagnética se presenta en una amplia gama de longitudes de onda y frecuencias” (Hecht, 2000), dependiendo de estas características, las ondas EM se pueden clasificar y visualizar en lo que se conoce como el espectro electromagnético, el cual se presenta en la figura 1.

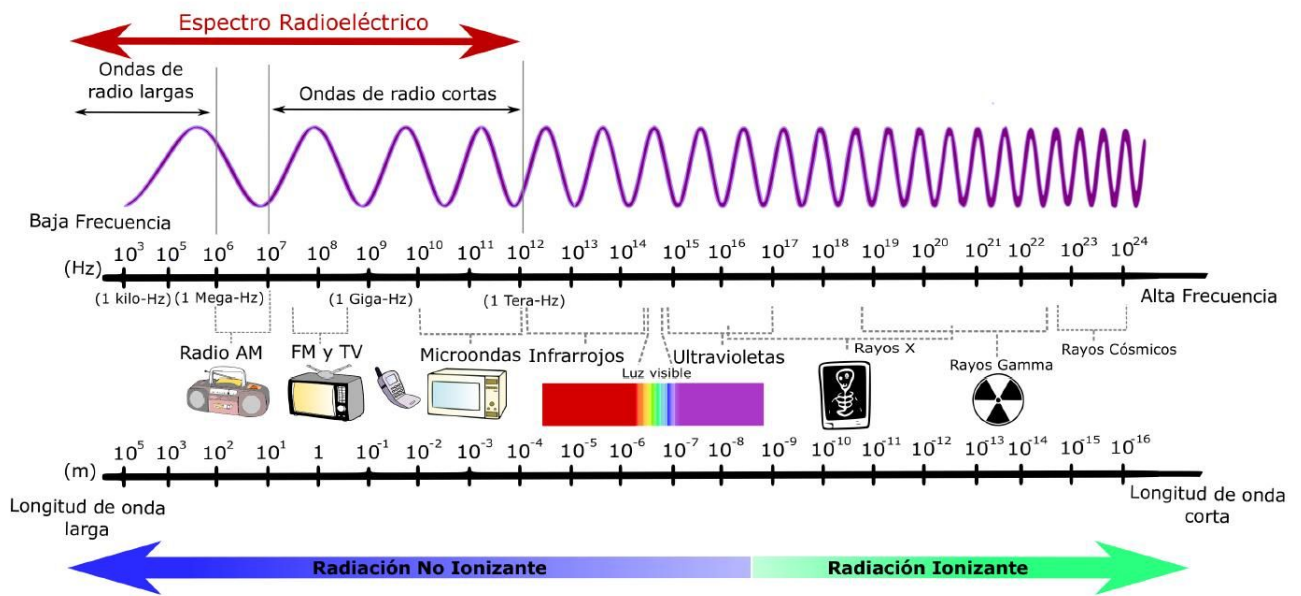


Figura 1: Espectro Electromagnético.

Tomado de:

<https://i.pinimg.com/originals/34/c7/5b/34c75b5725fdaf2384e0b508c5c62cb3.jpg>

El espectro electromagnético clasifica las ondas EM por frecuencia o longitud de onda así:

- **Ondas de radio:** son ondas de baja frecuencia, con una longitud de onda entre los 10^5 m y los 10^{-1} m.
- **Microondas:** tienen una frecuencia que se ubica entre los 10^{10} y 10^{12} Hz.
- **Radiación infrarroja:** posee una frecuencia de aproximadamente $10^{12} - 10^{14}$ Hz.
- **Luz Visible:** Se ubica entre la radiación infrarroja y el ultravioleta, como su nombre lo indica, es el único tipo de radiación que podemos percibir a simple vista, su longitud de onda se encuentra entre los 10^{-6} y 10^{-7} m.

- **Ultravioleta:** se caracteriza por tener una frecuencia entre los 10^{15} y los 10^{17} Hz, además cuenta con subclasificaciones.
- **Rayos x:** son muy usados en el área de la medicina, estos presentan una longitud de onda que se ubica entre los 10^{-8} y 10^{-12} m.
- **Rayos γ :** este tipo de radiación presenta una gran energía y es ionizante. Se origina de las reacciones nucleares y posee una frecuencia entre los 10^{16} y los 10^{20} Hz.

Las ondas EM también se pueden clasificar en radiaciones ionizantes y no ionizantes. La radiación x y γ son consideradas ionizantes debido a que cuando interactúan con la materia son capaces de desprender electrones de los átomos, lo cual genera una ionización y a su vez, desencadena diferentes reacciones químicas. Por su parte, desde las ondas de radio hasta el ultravioleta se considera que son radiaciones no ionizantes debido a que no tienen la energía suficiente como para desencadenar los procesos mencionados anteriormente.

4.1.1. Radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta fue descrita por J. W. Ritter en el año 1801 al investigar el extremo opuesto al rojo (época en la que Herschel realizó sus experimentos con luz infrarroja) del espectro visible. Ritter notó que el cloruro de plata se ennegrecía más rápidamente en la zona invisible más allá del violeta. (Cabrera, et al, 2006). La radiación ultravioleta puede producirse como radiación de frenado, radiación sincrotrón y por transiciones energéticas de los átomos (Cabrera, et al, 2006), dependiendo de la energía con la que cuenten se pueden distinguir tres tipos:

- **UV-A:** este tipo de radiación posee una longitud de onda que se encuentra entre los 400 – 315 nm. Debido a que no presenta una gran cantidad de energía (entre $4,9695 \times 10^{-19} J$ - $6,310 \times 10^{-19} J$) no genera daños en los organismos (Ballén et al, 2007).
- **UV-B:** ubicada entre los 315 – 280 nm, presenta una energía que oscila entre los $6,310 \times 10^{-19} J$ y $7,099 \times 10^{-19} J$, este tipo de radiación puede ser dañina en los tejidos biológicos cuando se realiza una exposición prolongada (Ballén et al, 2007).
- **UV-C:** esta radiación ultravioleta de onda corta es la más energética de todas, pues alcanza longitudes de 280 – 100 nm, las cuales poseen una energía entre $7,099 \times 10^{-19} J$ y $19,878 \times 10^{-19} J$. Aunque no es una radiación ionizante, su energía es capaz de generar reacciones fotoquímicas en las moléculas biológicas de los microorganismos (Bernedo, et al, 2020).

La principal fuente conocida de radiación ultravioleta es sol. Cada minuto inciden sobre la tierra los tres tipos de UV, sin embargo, la mayor parte de estos son absorbidos en la atmósfera por la capa de ozono y los gases atmosféricos, gracias a esto, la luz UV-C que llega a la superficie terrestre es mínima, por lo anterior, es necesario usar fuentes de radiación UV-C artificiales para realizar la inactivación de microorganismos.

4.2. Principios básicos de óptica

Al momento de realizar la irradiación de microorganismos, es posible que estos se encuentren en diferentes medios (agua, superficies solidas o blandas, aire, entre otros), por ello es fundamental comprender el comportamiento de las ondas electromagnéticas al pasar por diferentes medios de propagación.

Cuando una onda electromagnética se propaga en el vacío, tiene una velocidad constante $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$, que es la velocidad de la luz en el vacío, por otro lado, cuando se propaga en un medio material su velocidad estará determinada por (Aurengo & Petitclerc, 2008):

$$v = cn^{-1} \quad (1)$$

Donde n representa el *índice de refracción* y es propio del medio y de la longitud de onda de la radiación incidente, esta dependencia se da debido a que (Serway & Jewett, 2007):

$$v = \lambda f \quad (2)$$

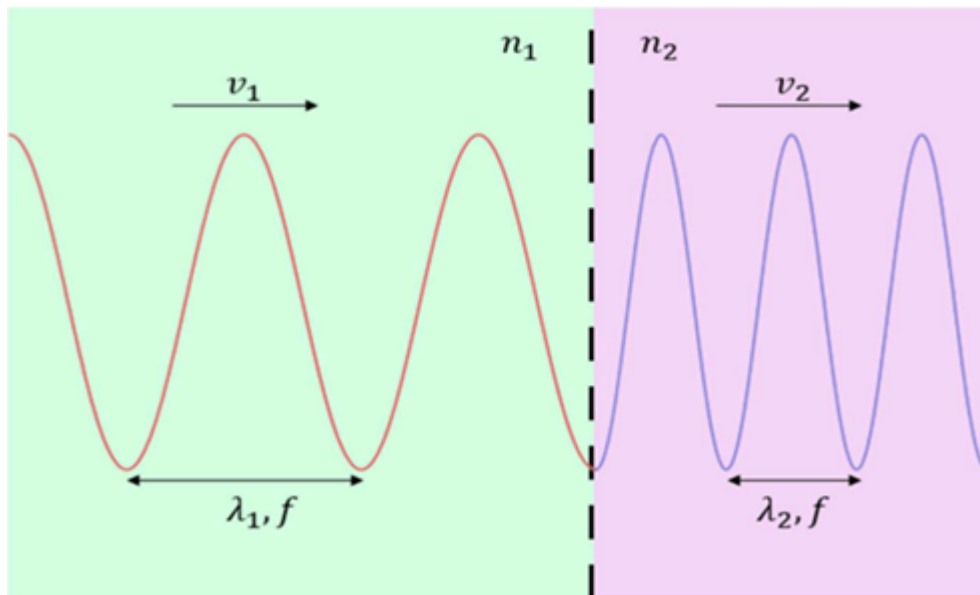


Figura 2: Refracción de una onda.

Cuando una onda proveniente de un medio 1 con índice de refracción n_1 incide sobre un medio 2 con n_2 , siendo $n_2 > n_1$ (Figura 2), va a experimentar un cambio en la velocidad de propagación (atenuación) debida a la refracción, de la siguiente manera:

$$v_1 = \frac{c}{n_1} > v_2 = \frac{c}{n_2} \quad (3)$$

Reemplazando v_n de la ecuación (2) se obtiene:

$$\lambda_1 f_1 = \frac{c}{n_1} > \lambda_2 f_2 = \frac{c}{n_2} \quad (4)$$

Para que exista una continuidad en la energía que se propaga entre los medios (continuidad de la interfase) se debe cumplir que $f_1 = f_2$ (Serway & Jewett, 2007; Sepúlveda Soto, 2009), por lo tanto, de la ecuación (4) se obtiene:

$$\lambda_1 > \lambda_2 \quad (5)$$

Ahora, considerando la energía que propaga una onda electromagnética de forma corpuscular (fotones), se tendrá una energía de la forma

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación (3)

$$E_1 = \frac{hc}{\lambda_1 n_1} \quad y \quad E_2 = \frac{hc}{\lambda_2 n_2} \quad (7)$$

De la ecuación (4) se obtiene también que $\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2$ (Serway & Jewett, 2007), por lo tanto, reemplazando dicha relación en (7) se obtiene

$$E_1 = E_2 \quad (8)$$

Es decir, la energía incidente en ambos medios es la misma, sin embargo, debido a la diferencia de las velocidades de propagación (ecuación 3), la potencia de radiación incidente se verá afectada, ya que

$$P = \frac{E}{t} \quad \rightarrow \quad P_1 > P_2 \quad (9)$$

La ecuación (8) indica que la onda incidente en el medio 2 necesita una mayor cantidad de tiempo para propagar la misma energía en comparación con la onda del medio 1 (por ello la potencia es menor), debido a la diferencia en la velocidad de propagación.

4.2.1. Absorbancia

Otra propiedad que influye en la radiación que llega al medio (y a los microorganismos) es la absorbancia, esta se relaciona inversamente con la transmitancia, es decir, cuando mayor energía se transmita entre los medios, menor energía será absorbida. Esta característica es propia del medio con cual se esté trabajando, pero no depende solo del tipo de medio, sino que también obedece al material particulado que se encuentre disuelto en este.

Contrario a lo mencionado en la sección anterior (cambio de medios disminuye la potencia de radiación, pero se continúa propagando la misma energía), en este caso si va a existir una pérdida de energía, la cuál será absorbida por el medio, las micropartículas que se encuentren en este y los microorganismos ya que han sido inactivados, pero permanecen en el medio.

Lo mencionado anteriormente indica que la intensidad de radiación emitida por la lampara de luz ultravioleta no va a ser la misma que llegue a los microorganismos blanco, entonces, para determinar la cantidad de Intensidad de radiación que llegue a estos se debe calcular el coeficiente de absorbancia α , el cual se puede calcular por medio de espectrofotometría (Chambi, 2020). La absorbancia es la cantidad de radiación absorbida por unidad de profundidad, suele representarse con la letra A . Para medios homogéneos y no dispersivos se suele usar la ley de

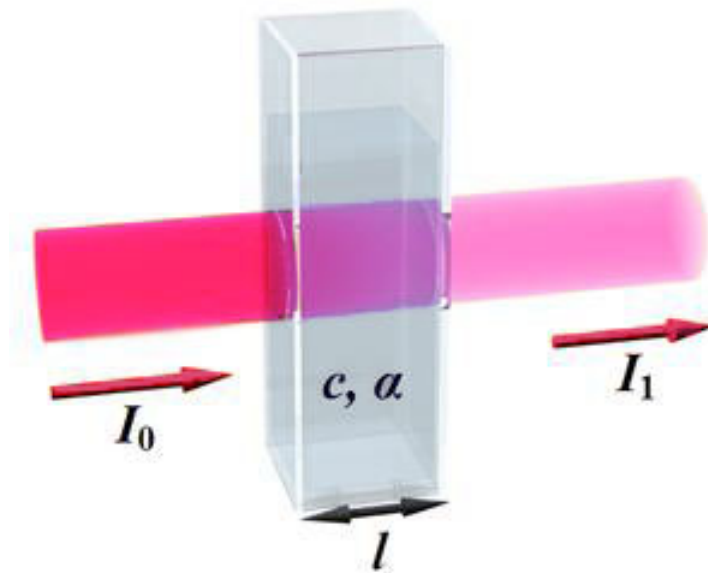


Figura 3: Ley de Beer-Lambert

Tomado de: https://www.differencebetween.com/difference-between-absorptivity-and-molar-absorptivity/#google_vignette

Beer-Lambert, esta relaciona la cantidad de luz o radiación entrante con la que sale del medio (Figura 3) y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-\alpha \cdot \ell} = 10^{-\epsilon \cdot \ell \cdot c} = 10^{-A} \quad (10)$$

Donde:

- A es la cantidad de luz absorbida
- I es la intensidad luminosa saliente.
- I_0 es la intensidad luminosa entrante.
- ϵ es la absortividad molar (o coeficiente de extinción), que se trata de una constante de proporcionalidad.
- ℓ es la longitud atravesada por la luz en el medio.
- α es el coeficiente de absorción.
- c es la concentración de la sustancia que absorbe la luz.

4.3. Dosis de Radiación

La dosis de radiación que se aplica a un sistema está dada por la intensidad de radiación incidente por el tiempo de exposición, es decir,

$$Dosis = Irradiancia (I) \cdot Tiempo de exposición (t) \quad (11)$$

Donde

$$I = \frac{Potencia(P)}{\acute{A}rea(A)} \quad (12)$$

En la ecuación (10) se evidencia que la dosis de radiación que se aplique será mayor, a medida que exista un mayor tiempo de exposición, además, como se muestra en la ecuación (11), tanto la dosis como la irradiancia dependen de la potencia de lámpara UV que se use y del área del sistema.

A partir de la ecuación (11), se determina también que cuanto mayor sea la distancia entre la muestra y la fuente de irradiación menor será la irradiancia sobre la superficie, por lo tanto, se tendrá que fijar un tiempo de exposición que permita que sobre todo el sistema se aplique la dosis mínima de inactivación de microorganismos.

Los estudios realizados por Cristiani, M y colaboradores en el año 2019 y por Rossel Ber-nedo y colaboradores en 2020 muestran que diferentes tipos y cepas de bacterias presentan respuestas diferentes a la radiación UV ya que las curvas de inactivación cumplían con funcio-nes diferentes a la exponencial o lineal (una vez se ha realizado la corrección logarítmica), esto indica, que una misma dosis de radiación sobre un ambiente contaminado no desinfectará de la misma manera todos los tipos de bacterias, por lo cual, si no se tiene un conocimiento sobre los microorganismos predominantes en el área de estudio, se debe usar la dosis de inactivación para la posible bacteria más resistente, en este orden de ideas, en la literatura se pueden encon-trar valores mínimos de dosis para la inactivación de diferentes microorganismos, como los que se muestran en la tabla 1 la cual es adaptada de Lecam, M. S. (2020) para relacionar únicamente los valores de dosis efectiva para una reducción de 2 unidades logarítmicas.

Bacteria	Dosis (Ws/m^2)
Bacillus anthracis-Anthrax	8,7
Bacillus anthracis-Anthrax (esporas)	46,2
Bacillus magaterium sp. (esporas)	5,2
Bacillus magaterium sp. (veg.)	2,5
Bacillus paratyphusus	6,1
Bacillus subtilis spores	22
Bacillus subtilis	11
Campylobacter jejuni	60
Clostridium pergringens (esporas)	640
Clostridium tetani	22
Corynebacterium diphtheriae	6,51
Ebertelia typhosa	4,1
Escherichia coli	6,6
Legionella neumophila	120
Leptospira canicola - infectus Jaundice	6
Micrococcus candidus	12,3
Micrococcus sphaeroides	15,4
Mycobacterium tuberculosis	10
Neisserie catarrhalis	8,5
Phytomonas tumefaciens	8

Bacteria	Dosis (Ws/m^2)
Proteus vulgaris	6,6
Pseudomonas aeruginosa	10,5
Pseudomonas fluorescens	6,6
Salmonella enteritidis	7,6
Salmonella paratyphi - fiebre entérica	6,1
Salmonella typhosa - fiebre tifoidea	4,1
Salmonella typhimurium	15,2
Sarcina lutea	26,4
Serratia marcescens	6,16
Shigella dysenteriae - Dysentery	4,2
Shigella flexneri -Dysentery	3,4
Shigella paradysenteriae	3,4
Shigella sonnei	80
Spirillum rubrum	6,16
Staphylococcus albus	5,72
Staphylococcus aureus	6,6
Staphylococcus hemolyticus	5,5
Staphylococcus lactis	8,8
Streptococcus faecalis	160
Streptococcus viridans	3,8
Vibrio cholerae	6,5
Yersinia enterocolitica	50

Tabla 1: Algunas bacterias y sus dosis efectivas.
Adaptado de Lecam, M. S. (2020)

4.4. Fuentes de luz UV-C

Como se mencionó anteriormente, debido a las dinámicas atmosféricas, no es posible usar la luz ultravioleta-C procedente del sol, lo cual conlleva a que sea necesario el uso de fuentes artificiales, sin embargo, estas no solo se usan como medio de desinfección, sino que también se usan en otras áreas como la medicina. Existen diferentes formas de producir radiación UV:

- **Tecnología Excimer:** consiste en la excitación de un gas dímero a través de la aplicación de una diferencia de potencial. Esta tecnología es muy usada en cirugías oculares. (García Carpintero et al, 2020).
- **UV-C LEDs:** se compone de un diodo semiconductor de algún material semiconductor como GaAs, GaP o INP, estos destacan ya que pueden emitir luz dentro del espectro UV-C (García Carpintero et al, 2020).

4.4.1. Lámparas de luz ultravioleta

Este tipo de lámparas usan, habitualmente, el mercurio para emitir luz. Se compone de un tubo generalmente de cuarzo con electrodos en los extremos y un gas en el interior, cuando

se aplica una diferencia de potencial los electrodos excitan los átomos dicho gas, los cuales, al regresar a su estado de reposo emiten un electrón (Figura 4).

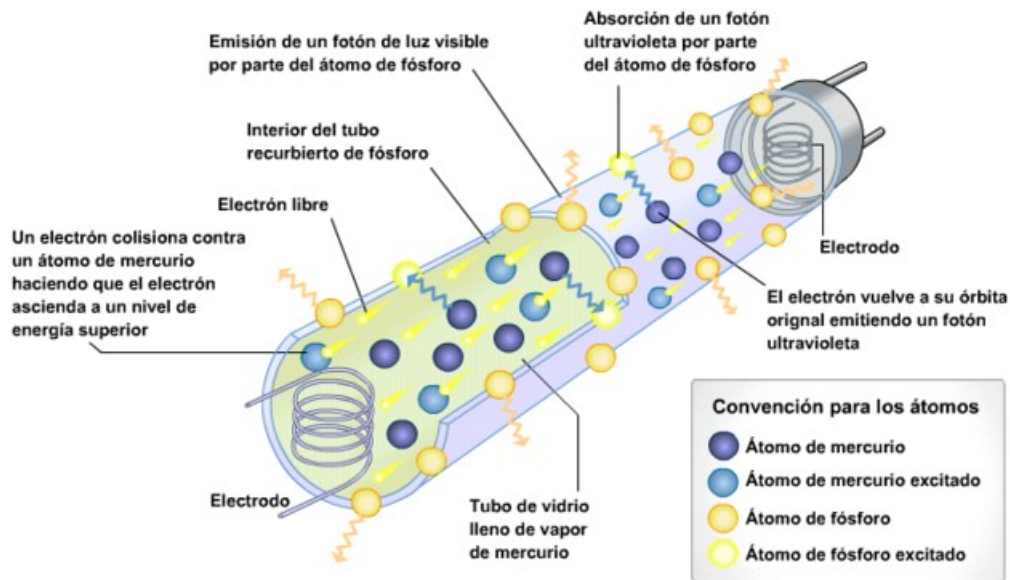


Figura 4: Esquema de una lámpara de mercurio.

Tomado de:

<https://hablemosunpocodetodo.blogspot.com/2010/08/lamparas-de-bajo-consumo.html>

La longitud de onda de los electrones que se desprenden depende del gas con el cual se trabaja y la potencia de la lámpara. Así mismo, depende la cantidad de átomos que se encuentren, o lo que es igual, la presión a la que se tenga dentro del tubo.

La fuente más usada en técnicas de desinfección es la lámpara de mercurio de baja presión (2×10^{-5} a 2×10^{-3} *psi*) (Chambi, 2021), esto debido a su relativo bajo costo y efectividad, pues emite fundamentalmente luz monocromática con longitudes de onda que alcanzan alrededor de los 250 nm, la cuál es la más efectiva para realizar inactivación de microorganismos (Osorio, 2018).

En la industria se pueden encontrar fuentes de radiación ultravioleta de distintos tamaños y potencias, también se pueden adquirir equipos completos para realizar la esterilización o únicamente las fuentes UV-C, en Colombia, existen empresas que se especializan en el diseño de equipos de desinfección basados en la tecnología ultravioleta, entre ellas se destacan las siguientes:

- UV-CLEAN (<https://uvclean.com.co/>):** Es una empresa de desinfección y fabricación de equipos con luz UV. Ofrecen soluciones de desinfección y esterilización para la vida. Garantizan ambientes 99.9% libres de virus y bacterias. Además, son pioneros en colocar a disposición de las personas equipos con lámparas UV diseñados para realizar servicios de desinfección y esterilización. No utilizan ningún producto químico para realizar sus procedimientos de desinfección con equipos ultravioleta para aire, agua, ambiente y superficies.

- **Synertech SAS (<https://www.synertech.com.co/>):** Es uno de los principales fabricantes de sistemas de desinfección ultravioleta. Ofrecen potentes sistemas UV-C para desinfección ultravioleta para la desinfección del aire y de la superficie. Han implementado soluciones completas integrales en una amplia gama de áreas e industrias durante más de 30 años.

5. Fundamentos biológicos

5.1. Microorganismos

Se ha mencionado anteriormente que la desinfección mediante luz ultravioleta va encaminada a microorganismos, sin embargo, dicha palabra abarca una gran cantidad de seres, debido a esto es importante mostrar la clasificación que estos presentan.

Según su forma, tamaño, tipo de reproducción, capacidad metabólica y de adaptación, se pueden identificar distintos grupos de los cuales se enfocarán 3: virus, hongos y levaduras y bacterias.

- **Bacterias:** estos microorganismos cuentan con moléculas tanto de ADN como de ARN y pertenecen al grupo de los procariontes, es decir, carecen de núcleo celular, mitocondrias, retículo endoplasmático y aparato de Golgi, su reproducción es asexual (Murray, 2018) y su material genético permanece disperso en el citoplasma. Es un organismo unicelular y su tamaño oscila entre los 0.5μ y 5μ de longitud, por esta razón no son visibles a simple vista y cuando se realizan recuentos se usan como medidas las UFC (Unidades Formadoras de Colonias). Las bacterias se presentan en diferentes formas: bacilos, cocos, filamentos, espirilos y vibrios, además, tienen subclasificaciones dependiendo de su morfología, el método más común para realizar la clasificación es la tinción Gram, la cual se soporta en las características químicas de la membrana celular de las bacterias; si al momento de realizar la tinción Gram las bacterias se observan de color morado, serán clasificadas como Grampositivas, por otro lado, si se visualizan de un tono rojo o rosa se dirá que son bacterias Gramnegativas (Sánchez, M., 2017).
- **Hongos y levaduras:** estos microorganismos pertenecen al dominio Eucarionte, por lo cual poseen una mayor complejidad. Los hongos se clasifican en unicelulares y pluricelulares, un ejemplo cotidiano de estos son las levaduras que se usan para fermentar la cerveza y los champiñones, respectivamente, también se pueden clasificar según su tipo de hábitat en saprófitos, los cuales se alimentan de sustancias en descomposición; simbioses: se asocian con otros organismos para obtener beneficios mutuos y parásitos: son aquellos que se alimentan de los fluidos internos de otros seres vivos. La diferencia entre hongos y levaduras es que en estas predomina una fase unicelular, mientras que los hongos pueden ser pluricelulares. Algunos de estos microorganismos pueden ser usados para beneficio de las personas (levaduras de la cerveza y el pan), sin embargo, también existen ciertos tipos, como los hongos dermatofitos, los cuales secretan enzimas que degradan las proteínas (para mejorar la adherencia en el hospedero) y se alimentan de la queratina de los organismos, provocando de este modo una infección denominada micosis en zonas como las uñas, la piel y los pelos (Sánchez, M., 2017), el principal antimicótico que se usa para combatir infecciones por hongos es la nistatina, este compuesto se une a los

esteroles de la membrana celular, provocando de esta manera un cambio en la permeabilidad de la membrana y la consecuente fuga de componentes intracelulares esenciales (Armenta, 2022).

- **Virus:** los virus no se consideran seres unicelulares, pues su estructura no es lo suficientemente compleja para considerarlo, ya que en la mayoría de los casos se compone únicamente de una molécula de ADN o ARN (genoma vírico) cubierta por una “cáscara” de proteínas la cual se denomina cápside, estas características indican que no tiene un metabolismo propio y su replicación va a depender de las células a las que invada. Los virus pueden causar pequeñas gripes o resfriados, pero también complejas enfermedades como la infección por virus de papiloma humano y el síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA). En la naturaleza, los virus se pueden encontrar de dos maneras: intracelular y extracelular, en el primer caso, como su nombre lo indica, el virus se encuentra dentro de la célula hospedera y logra que esta cree los elementos necesarios para ensamblar más virus, los cuales van a infectar a otras células; siguiendo este orden de ideas, cuando se encuentran en la fase extracelular es el momento en que tienen la capacidad de desplazarse y transmitirse de un hospedero a otro (Sánchez, M., 2017).

5.2. Mecanismo biológico de desinfección

Aunque la inactivación con luz ultravioleta puede ser usada en distintos tipos de microorganismos (Lecam, 2020) son las bacterias las que requieren una menor dosis, pues como se evidenció en la sección anterior, estas, al no poseer núcleo celular, tienen el material genético libre en el citoplasma, por lo tanto, cuando una radiación incide sobre ellas, atraviesa la membrana celular del organismo y las moléculas biológicas se ven directamente afectadas.

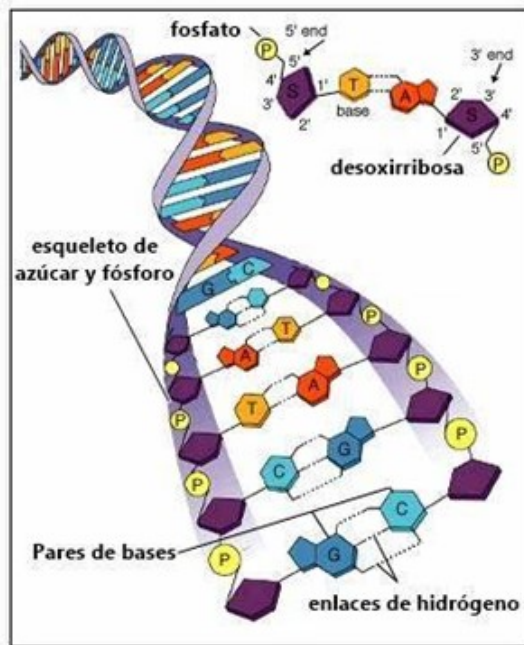


Figura 5: Estructura del ADN

Tomado de: <https://www.biocuriosidades.com/adn-basura/>

Siguiendo este orden de ideas, cuando sobre una bacteria incide radiación dentro del espectro ultravioleta ocurre una reacción fotoquímica denominada dimerización de pirimidinas; esta reacción es la más frecuente y efectiva en la inactivación de bacterias (García-Carpintero, 2020). Para comprender este fenómeno es necesario recordar la estructura que posee el ADN (Figura 5): se compone de una doble cadena, unidas por enlaces de hidrógeno, cada cadena posee un azúcar pentosa, un grupo fosfato y una base nitrogenada. Dichas bases se clasifican, según su estructura en purinas y pirimidinas, de la siguiente manera (Starr & Taggart, 2009):

Purinas	Pirimidinas
Guanina	Timina
Adenina	Citocina

La dimerización de pirimidinas se da cuando dos bases consecutivas de la misma cadena se unen con un doble enlace debido a la energía que es transmitida por la radiación incidente (Figura 6), esta unión genera errores en la replicación del ADN, lo cual impide el crecimiento de las colonias bacterianas y en algunos casos, lleva a la muerte celular.

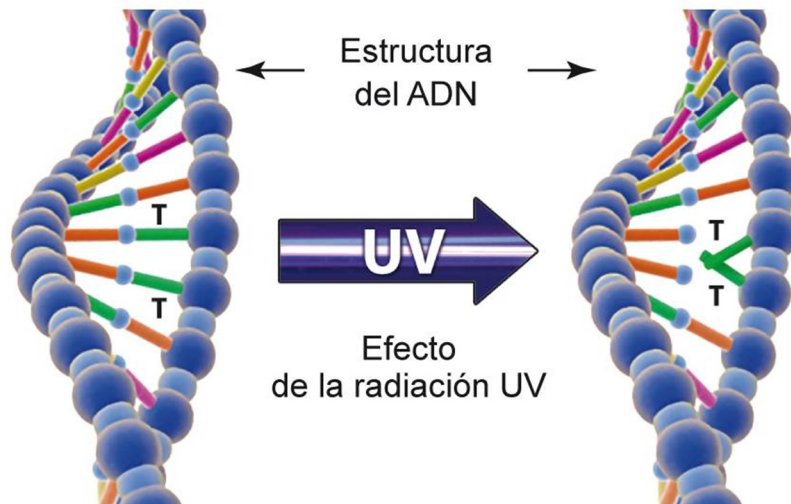


Figura 6: Dimerización de Timina.
 Tomado de: <https://www.lifetech.cl/ultravioleta/>

El hecho de que la radiación ultravioleta C cause ese tipo de reacciones en la molécula del ADN tiene su explicación si se observa el espectro de absorción de radiación que tienen las bases nitrogenadas (figura 7), en este se evidencia que la absorción se da aproximadamente entre los 220 nm y los 290 nm (para todas las bases), teniendo su pico de absorción entre 254 nm y 270 nm , ubicándose este espectro de longitudes de onda en la radiación UV-C.

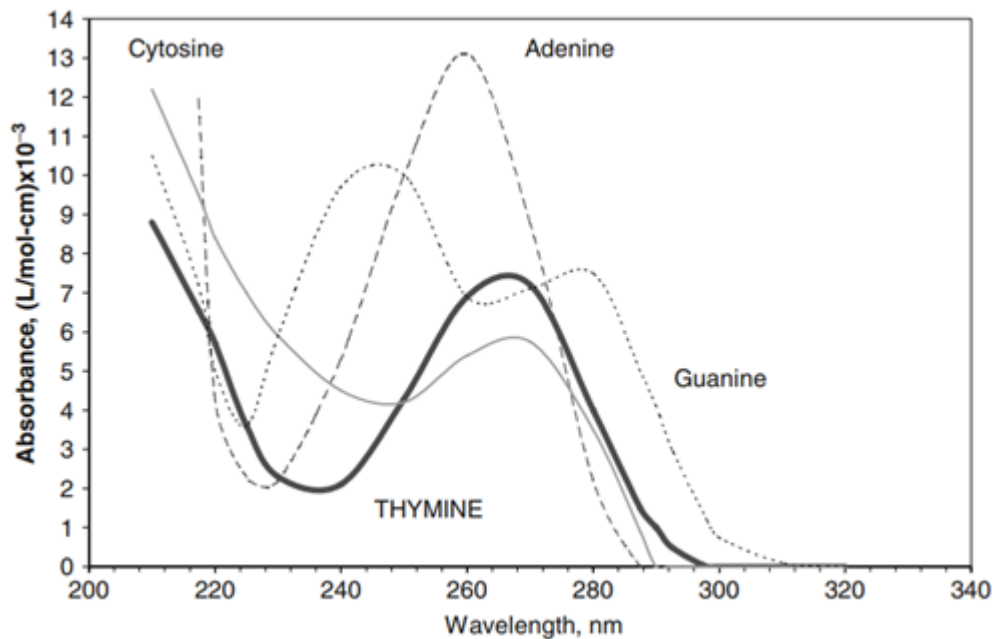


Figura 7: Espectro de absorción de las bases nitrogenadas.
 (Kowalski, 2009)

5.3. Determinación de microorganismos

Para determinar si la inactivación por radiación ultravioleta es efectiva, se debe realizar un conteo de los microorganismos antes y después de aplicada la técnica de desinfección, dicha relación se puede expresar como (Chambi, 2021):

$$\%Inactivación = \frac{M.iniciales - M.finales}{Microorganismos\text{iniciales}} \cdot 100 \quad (13)$$

Otra manera de analizar el comportamiento de la inactivación bacteriana es mediante la cinética de desinfección, la cual se representa mediante una ecuación diferencial de primer orden denominada ley de Chick (Chambi, 2021; Acosta Castellanos et al., 2016)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (14)$$

Donde:

N : número de microorganismos viables

λ : constante de inactivación

La ecuación (13) tiene una solución de la forma

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (15)$$

Donde N_0 : concentración bacteriana inicial.

La ecuación (14) se puede expresar también como:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \quad (16)$$

En microbiología se usa la escala logarítmica para hablar de concentraciones bacterianas, por lo tanto, se reescribe la ecuación (15) en términos de logaritmo en base 10:

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kt \quad (17)$$

Donde $k = \lambda \log e$

Por lo tanto, si se grafica el logaritmo de la concentración bacteriana respecto al tiempo, es posible determinar la constante de inactivación o decaimiento de la concentración bacteriana, ya que esta será la pendiente de la gráfica.

6. Análisis de resultados en la literatura

Para seleccionar los estudios a revisar, se tuvo en cuenta el criterio del año de publicación, que fuera superior al 2010, además de la pertinencia de los temas tratados. Entre los escogidos se encuentran artículos de revisión, tesis doctorales, tesis de pregrado y artículos experimentales.

En la tabla (2) se presentan los documentos que se revisaron, indicando título, fecha de publicación y las variables que trabajan (si son experimentales) o, en su defecto, la naturaleza de la publicación.

	Título	Año	Variables
1	ANÁLISIS DE INTERFERENCIA DE PARÁMETROS FÍSICOS DEL AGUA, EN DESINFECCIÓN POR RADIACIÓN UV	2016	Tiempo, Turbiedad, Altura de la columna de agua
2	DESINFECCIÓN DE AGUA CON UV-C: ESTUDIO DEL DAÑO AL ADN DE DOS INDICADORES DE CALIDAD DE AGUA MEDIANTE ERIC-PCR	2019	Potencia Dosis
3	DESINFECCIÓN MEDIANTE EL USO DE LUZ UV-C GERMICIDA EN DIFERENTES MEDIOS COMO ESTRATEGIA PREVENTIVA ANTE LA COVID-19	2020	Revisión Bibliográfica
4	“DISEÑO DE SISTEMA BASADO EN LUZ UV-C PARA LA DESINFECCIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS EN ÁREAS HOSPITALARIAS”: una revisión de la literatura científica	2020	Revisión Bibliográfica
5	EFECTO DE LA RADIACIÓN UV-C EN FRUTAS Y VERDURAS	2013	Resumen de contenido
6	ESTUDIO DEL DAÑO PRODUCIDO EN EL ADN Y PROTEÍNAS DE ESCHERICHIA COLI POR DESINFECCIÓN MEDIANTE RADIACION UV-C y APA.	2018	Potencia Dosis
7	ESTUDIO DE LA RADIACIÓN UV-C COMO MÉTODO DE DESINFECCIÓN DE AMBIENTES Y SUPERFICIES CON ENFOQUE EN LA PREVENCIÓN DEL CONTAGIO DE COVID-19	2020	Resumen de contenido
8	EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL USO DE LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN LA DESCONTAMINACIÓN BACTERIANA DE LAS AGUAS DEL RÍO CHILI	2021	Dosis
9	IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA COMO GERMICIDA EN INSTRUMENTOS DE COCINA, PARA LA INACTIVACIÓN DE LAS BACTERIAS E-COLI Y STAPHYLOCOCCUS AUREUS.	2018	Intensidad de Radiación
10	RADIACIÓN ULTRAVIOLETA-C PARA DESINFECCIÓN BACTERIANA (COLIFORMES TOTALES Y TERMOTOLERANTES) EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE	2020	Tiempo de Exposición
11	EFICACIA DE LA LUZ ULTRAVIOLETA C COMO AGENTE BACTERICIDA EN LAS PIEZAS DE MANO EN LA CLÍNICA ODONTOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE NEIVA	2023	Bacterias Orales
12	EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LA RADIACIÓN UV-C EN LA ELIMINACIÓN DE ESCHERICHIA COLI Y BACTERIAS AÉREAS MESÓFILAS EN MASAS DE AGUA, EMPLEADAS EN ENLATADOS DE PESCADO.	2023	Tiempo de exposición

	Título	Año	Variabes
13	ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA DE LA TURBIDEZ EN LA EFECTIVIDAD DEL TRATAMIENTO TERCIARIO DE AGUAS UTILIZANDO RADIACIÓN ULTRAVIOLETA EN LA ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS INDICADOS	2022	Turbiedad
14	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ESTERILIZACIÓN EMPLEANDO RADIACIÓN UV-C PARA ALIMENTOS INDUSTRIALIZADOS	2023	Dosis de radiación, Distancia del Foco
15	APLICACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS LINEALES Y NO LINEALES PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA LUZ ULTRAVIOLETA DE ONDA CORTA SOBRE <i>Lactobacillus rhamnosus</i> INOCULADO EN SOLUCIONES MODELO	2022	Tiempo de Exposición

Tabla 2: Artículos revisados en la literatura.

La desinfección es un proceso que tiene que llevarse a cabo para evitar poner en riesgo la salud de los seres vivos, para ello se han desarrollado diferentes métodos, los cuales tienen sus ventajas y desventajas; un proceso muy usado comúnmente es el de la cloración, sin embargo, este ha ido perdiendo fuerza debido a la gran cantidad de reactivos químicos peligrosos que requiere y de su naturaleza tóxica y potencialmente cancerígena (Rossel Bernedo, L et al, 2020), debido a esto, la propuesta del uso de radiación UV ha ido tomando fuerza apoyada en el hecho de que requiere poco tiempo de exposición, no usa compuestos químicos peligrosos, es efectiva en la mayoría de microorganismos y permite reducir costos en los tanques de tratamiento (Rossel Bernedo, L et al, 2020).

De los estudios relacionados en la tabla 1, se pueden destacar resultados importantes como los presentados en la figura 8, el estudio realizado por Rossel Bernedo y colaboradores en el año 2020 logró obtener una inactivación bacteriana total a un tiempo de exposición de 4 segundos, esto apoya el hecho de que la técnica que inactivación con radiación ultravioleta requiere un tiempo de exposición bajo. De igual forma, otra característica que se evidencia en los estudios

<i>Nº de muestra</i>	<i>COLIFORMES TOTALES</i>				
	<i>UFC/100ml</i>				
	<i>CONTROL</i>	<i>TIEMPO DE EXPOSICIÓN</i>			
		<i>1 s</i>	<i>2 s</i>	<i>3 s</i>	<i>4 s</i>
<i>1</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>45</i>	<i>0</i>
<i>2</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>180</i>	<i>56</i>	<i>0</i>
<i>3</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>98</i>	<i>0</i>
<i>4</i>	<i>>200</i>	<i>>200</i>	<i>80</i>	<i>37</i>	<i>0</i>

Figura 8: Coliformes totales en agua cruda (Bernedo, L et al., 2020)

es la relación directa que tiene la potencia de radiación incidente (es proporcional a la dosis) con la inactivación bacteriana; estudios como el de Mariana Cristiani y colaboradores realizado

en el año 2019, en el cual se usan filtros para disminuir la potencia que llega a al medio que se irradia son de suma importancia para determinar la energía mínima que se puede aplicar a la hora de inactivar una cepa. En este caso, la figura 8 muestra que la concentración de la bacteria *P. aeruginosa* se redujo en mayor medida cuando la radiación incidente estaba al 100% de la potencia de la lámpara. En este estudio se manejaron tiempos de exposición prolongados (en comparación con el estudio de Bernedo y colaboradores) sin embargo, la concentración bacteriana decreció en alrededor de 5 unidades logarítmicas (para el caso del 100% de radiación). No cabe duda de que el uso de la radiación ultravioleta como método de desinfección bacteriana tiene alta efectividad y permite reducir la concentración de unidades formadoras de colonias en alrededor de 5 unidades logarítmicas (Cristiani, M et al, 2019) (Figura 9) e incluso, en algunos casos, la concentración bacteriana ha llegado a 0 UFC/ml (Rossel Bernedo, L et al, 2020) (Figura 8). Además, este método actualmente se encuentra bien caracterizado ya que se han realizado pruebas con diferentes bacterias (Rossel Bernedo, L et al, 2020 ; Cristiani, M et al, 2019; Chambi, 2021), se han establecido los distintos parámetros físicos que interfieren en la desinfección (Acosta Castellanos et al., 2016) y, por supuesto, se han usado diferentes valores de potencia de irradiación variando la distancia de la fuente a la muestra (Osorio, S, 2018) y mediante el uso de filtros (Cristiani, M et al, 2019).

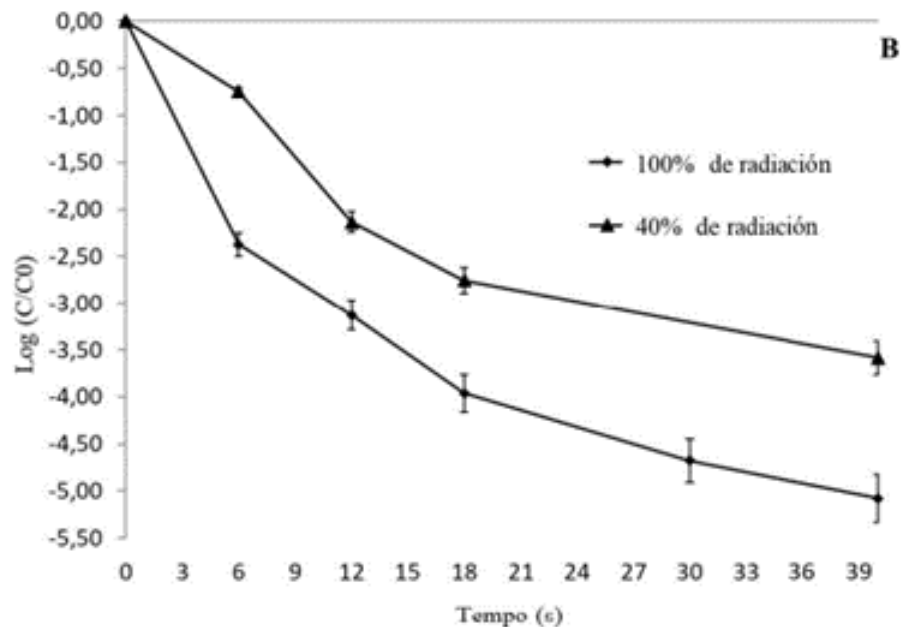


Figura 9: *P. aeruginosa* a dos intensidades.
(Cristiani, M et al., 2019)

Actualmente, el uso de las diferentes radiaciones para cualquier fin es altamente cuestionado debido a la creencia de que puede causar diferentes patologías en los seres humanos (quemaduras, malformaciones, tumores e incluso cáncer), sin embargo, estudios como los mencionados anteriormente justifican que la luz ultravioleta no clasifica dentro de las radiaciones ionizantes (Chambi, 2021; Osorio, S, 2018; Quezada Díaz, 2023), por lo cual, su uso puede ser extendido a diferentes ámbitos sin causar perjuicios graves; lo expresado anteriormente no libera a este tipo de radiación de cualquier efecto en los humanos, ya que si no se tienen los cuidados

necesarios (uso de protector solar y lentes con filtro UV) puede causar quemaduras similares a las que se dan por exposición prolongada al sol (Chambi, 2021).

7. Conclusiones

El reciente aumento del uso de la radiación UV muestra que las tecnologías pueden evolucionar y el ser humano puede aprovechar los fenómenos que se observan en la naturaleza para su propio beneficio. Además, realizar estudios que involucren esta técnica permite que esta logre permear otras áreas del conocimiento.

Teniendo en cuenta los estudios relacionados en la tabla 2 se concluye que la radiación ultravioleta, aunque no clasifica dentro de las radiaciones ionizantes, causa reacciones fotoquímicas en los organismos, por lo cual, daña el mecanismo de reproducción bacteriano impidiendo que estas se repliquen en un medio, llevándolas inminentemente a su desaparición. Esta forma de llevar a cabo la desinfección evita el uso de sustancias químicas fuertes que pueden dañar la salud humana y del ecosistema.

La efectividad de la técnica de desinfección por radiación ultravioleta ha sido demostrada en la inactivación de diferentes tipos de microorganismos y cepas. La dosis de radiación necesaria para lograr la inactivación varía según el tipo de microorganismo y la cepa. Por lo tanto, es importante determinar la dosis de radiación adecuada para cada caso específico a fin de garantizar una desinfección efectiva .

El uso de la radiación ultravioleta como método de inactivación de microorganismos es una técnica efectiva y segura. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para diferentes ambientes y fines, el uso de la radiación ultravioleta debe hacer uso de diferentes consideraciones (muestreo, distancias, potencia de irradiación, equipos y metodología). Por lo tanto, queda abierto el estudio y la experimentación para diferentes circunstancias (ambientes hospitalarios, agricultura, afluentes de agua o alimentos). Se espera que en los próximos años, este método de desinfección sea altamente usado en la mayoría de lugares y ámbitos de la vida.

Referencias

1. Acosta Castellanos, P. M., Caro Camargo, C. A., & Perico Granados, N. R. (2016). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. En Revista de Tecnología (Vol. 14 (2) pp. 105-112). <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1874>
2. Armenta, E. (2022). Complejos de biopolímeros como sistemas de liberación sostenida de nistatina en la cavidad bucal. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Baja California]. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/6e3f7cf8-66e3-4cc6-83ff-e5d5e4bcd1ce/content>
3. Arriaga L., D. (2022) Aplicación De Modelos Matemáticos Lineales Y No Lineales Para Evaluar El Efecto De La Luz Ultravioleta De Onda Corta Sobre Lactobacillus rhamnosus Inoculado En Soluciones Modelo. [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/18362>
4. Aurengo, A., & Petitclerc, T. (2008). Biofísica, 3a ed. McGraw-Hill Interamericana. ISBN:978-84-486-0855-2. URL: https://www.academia.edu/40000807/Biof%C3%ADsica3a_Aurengo
5. Cabrera, J., López, F., & López, J. (2006). Óptica Electromagnética: Fundamentos (Vol. I). Addison-Wesley Iberoamericana, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid. ISBN 8478290214
6. Chambi, L. V. (2021). Evaluación experimental del uso de la radiación ultravioleta en la descontaminación bacteriana de las aguas del río Chili. (Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa). <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12587>
7. Correa, M., Mera, S., Guacho, F., Villarreal, E., & Valencia, S. (2020). Desinfección mediante el uso de luz UV-C germicida en diferentes medios como estrategia preventiva ante la COVID-19. En Minerva (Vol. 1, Número 2, pp. 46-53). <https://doi.org/10.47460/minerva.v1i2.11>
8. Cristiani, M. (2016). Estudio del daño producido en el ADN y proteínas de *Escherichia coli* por desinfección mediante radiación UV-C y APA. En Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química INTEC-UNL-CONICET. <http://hdl.handle.net/11185/2284>
9. Cristiani, M., Brandi, R. J., Tedeschi, F., Zalazar, F. E., & Labas, M. D. (2019). Desinfección de agua con UV-C: Estudio del daño al ADN de dos indicadores de Calidad Agua mediante ERIC-PCR. Contaminación Atmosférica e hídrica en Argentina. (pp. 532 - 540). Universidad Tecnológica Nacional. <http://hdl.handle.net/11336/137535>
10. Franco P., P. (2023). Eficacia de la luz ultravioleta C como agente bactericida en las piezas de mano en la clínica odontológica de la Universidad Antonio Nariño sede Neiva. [Tesis de pregrado, Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/8681>
11. Gaona-González, J., Merino-Vivanco, R., Carrión-González, J., Vega-León, A., González-Espinosa, J., & Vargas-Naula, A. (2023). Diseño y construcción de un prototipo de esterilización empleando radiación UV-C para alimentos industrializados. CEDAMAZ, 13(1), 56-64. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v13i1.1844>

12. García Carpintero EE, Cárdbaba Arranz M, Sánchez Gómez LM. Revisión bibliográfica sobre eficacia y seguridad de la luz ultravioleta y ozono para la desinfección de superficies. Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias (AETS) - Instituto de Salud Carlos III, Ministerio de Ciencia e Innovación. Madrid. 2020. Informes de Evaluación de Tecnologías Sanitarias. <http://hdl.handle.net/20.500.12105/10618>
13. Haro - Maza, J. F., & Guerrero - Beltrán, J. A. (2013). Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. En *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* (Vol. 7, Número 1, pp. 68-77). URL: <https://tsia.udlap.mx/efecto-de-la-radiacion-uv-c-en-frutas-y-verduras/>
14. Hecht, E. (2000). *óptica*. Madrid: Addison Wesley Iberoamericana. ISBN: 8478290257. URL: <https://es.scribd.com/document/557910639/Hecht-Optica>
15. Kowalski, W. (2009). UVGI Disinfection Theory. En: *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9_2
16. Lecam, M. S. (2020). Estudio de la radiación UV-C como método de desinfección de ambientes y superficies con enfoque en la prevención del contagio de COVID-19. En UVR. URL: https://www.academia.edu/42656847/Estudio_de_la_radiaci%C3%B3n_UV_C_como_m%C3%A9todo_de_desinfecci%C3%B3n_de_ambientes_y_superficies_con_enfoque_en_la_preveni%C3%B3n_del_contagio_de_COVID_19
17. Murray, P. R., Rosenthal, K. S., & Pfaller, M. A. (2016). *Medical Microbiology* (8a ed.). Elsevier. ISBN: 978-0-323-29956-5. URL: https://www.academia.edu/38151791/Microbiologia_de_Murray_8va_edici%C3%B3n
18. Osorio Giraldo, S. (2018). Implementación de un sistema de radiación ultravioleta como germicida en instrumentos de cocina, para la inactivación de las bacterias E-coli y Staphylococcus Aureus. En Universidad Tecnológica de Pereira. <https://hdl.handle.net/11059/9407>
19. Pacherez Mamani, P. A. (2020). Diseño de sistema basado en luz UV-C para la desinfección de instrumentos quirúrgicos en áreas hospitalarias: una revisión de la literatura científica. En Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/25511>
20. Proaño M, K. (2022). Análisis De La Interferencia De La Turbidez En La Efectividad Del Tratamiento Terciario De Aguas Utilizando Radiación Ultravioleta En La Eliminación De Microorganismos Indicadores. [Tesis, Universidad Politécnica Salesiana]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23586>
21. Quezada Díaz, B. A. (2023). Evaluación de la eficiencia de la radiación UV-C en la eliminación de Escherichia coli y bacterias aéreas mesófilas en masas de agua, empleadas en enlatados de pescado. [Tesis de biología, Universidad Estatal Península de Santa Helena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9671>
22. Rossel Bernedo, L. J., Rossel Bernedo, L. A., Ferro Mayhua, F. P., Ferro Gonzales, A. L., & Ronal Reynaldo, Z. Q. (2020). Radiación ultravioleta-c para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. En *Revista de Inves-*

tigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research (Vol. 22, Número 1, pp. 68-77).
<https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>

23. Sánchez Contreras, M., Gonzales Flores, T., Ayora Talavera, T., Evangelista, Z. & Pacheco, N. (2017). ¿Qué son los microbios? *Ciencia*, 68(2). http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/68_2/PDF/QueSonMicrobios.pdf
24. Sepúlveda Soto, A. (2009). *Electromagnetismo*. Universidad de Antioquia. ISBN: 978-958-714-207-5.
25. Serway, R. A., & Jewett, Jr, J. W. (2007). *Física para ciencias e ingenierías con física moderna*. Vol. 2. 7e. CENGAGE Learning. ISBN-10: 607-481-358-2. URL: https://www.academia.edu/14276551/Fisica_para_ciencias_e_ingenieria_con_Fisica_Moderna_Volumen_2
26. Starr, C., & Taggart, R. (2009). *Biología* (12.^a ed.). CENGAGE Learning. ISBN:0-495-55792-7. URL: https://www.academia.edu/49374225/Libro_Biologia_Biolog%C3%ADa_La_Unidad_y_la_Diversidad_de_la_Vida_Starr_Taggart_Evers_Starr_12_Edici%C3%B3n