

Cinética de la Desinfección Fotocatalítica de Agua contaminada con *E. coli*. Efecto de la Concentración del Fotocatalizador y la Potencia de Irradiación

Andrea L. Moreno, Camilo A. Castro, Aristóbulo Centeno y Sonia A. Giraldo

Escuela de ingeniería Química, Centro de Investigaciones en Catálisis (CICAT), Universidad Industrial de Santander (UIS), Cra. 27, Calle 9, Bucaramanga-Colombia
(e-mail: sgiraldo@uis.edu.co).

Recibido Oct. 04, 2010; Aceptado Nov. 30, 2010; Versión Final recibida Dic. 16, 2010

Resumen

Se estudió la cinética de la desinfección fotocatalítica de agua (DFA) con *E. coli* usando dos ecuaciones cinéticas tipo Langmuir-Hinshelwood de tres parámetros: la constante cinética, la constante de interacción bacteria-fotocatalizador y el coeficiente de inhibición. Se analizó el efecto de la concentración de TiO_2 y la potencia de irradiación sobre los parámetros cinéticos. En los intervalos estudiados, la constante cinética incrementa con el aumento de la concentración del fotocatalizador y de la potencia de irradiación, mientras que, la constante de interacción bacteria-fotocatalizador disminuye. Además, el coeficiente de inhibición no presenta dependencia de estas variables. Se usaron medios selectivos para seguir la concentración de bacterias con el fin de evaluar el efecto de la DFA sobre la bacteria y los daños sucesivos que ocurren en ésta hasta llegar a un umbral límite de daño. El modelo cinético utilizado permite la predicción de valores aproximados de las poblaciones bacterianas lastimadas y no lastimadas.

Palabras clave: inactivación de bacterias, fotodesinfección, parámetros cinéticos, bacterias lastimadas

Kinetics of the Photocatalytic Disinfection of Water contaminated with *E. coli*. Effect of the Photocatalyst Concentration and of the Irradiation Power

Abstract

The photocatalytic water disinfection (PWD) kinetics with *E. coli* was studied, using two Langmuir-Hinshelwood type kinetic equations involving three parameters: the kinetic constant, the interaction bacteria-photocatalyst constant, and the inhibition coefficient. The TiO_2 concentration and the irradiation power were modified, and their effects on the inactivation kinetics were analyzed. It was found that the kinetic constant increased with the increase of the catalyst concentration and the irradiation power, while the constant related to the interaction bacteria-photocatalyst decreased. In addition, it was found that the inhibition coefficient does not depend on these variables. Furthermore, the bacteria concentration was followed using selective media to assess the effect of the PWD process on the bacteria, and its subsequent attacks to reach a threshold limit of damage. It was observed that the kinetic model predicts approximate values of the undamaged and injured bacteria population.

Keywords: bacteria inactivation, photodisinfection, kinetic parameters, injured bacteria

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el uso de la fotocatalisis con TiO_2 ha generado gran interés como una nueva alternativa para la desinfección fotocatalítica de agua (DFA), teniendo en cuenta que el TiO_2 al absorber la luz ultravioleta, genera especies oxidantes tales como peróxido (HO_2^\cdot), hidroxilo ($^\cdot\text{OH}$), y superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$), útiles en la inactivación de bacterias presentes en el agua (Rincón *et al.*, 2005; Coleman *et al.*, 2005; Hoerter *et al.*, 2005; Sichel *et al.*, 2007). Se ha encontrado que el radical que genera mayor incidencia en la desinfección de poblaciones bacterianas es el $^\cdot\text{OH}$ (Srinivasan y Somasundaran, 2003), el cual actúa como iniciador de una serie de reacciones en cadena conocidas como peroxidación lipídica que generan la descomposición de los ácidos grasos poliinsaturados (AGP), que le dan fluidez e integridad estructural de las células. Esta desestabilización da lugar al desmoronamiento de la estructura de la membrana celular que conduce a una pérdida de permeabilidad, resistencia mecánica, movilidad y fluidez de la membrana y posteriormente lisis y muerte (Maness *et al.*, 1999). La peroxidación de la membrana hace que la muerte de las bacterias se dé mediante la acumulación de diferentes niveles de daño que implican la coexistencia de bacterias lastimadas y no lastimadas en cada instante. Dichos niveles de daño están determinados por la cantidad de $^\cdot\text{OH}$ producidos durante la iluminación del TiO_2 . (Rincón *et al.*, 2003, 2004a; Benabbou *et al.*, 2007). Rizzo (2009) propone cuantificar las poblaciones lastimadas y las no lastimadas utilizando simultáneamente el medio enriquecido mT7 para el crecimiento de ambas poblaciones, y el selectivo mEndo, que inhibe la recuperación de bacterias con daño estructural y metabólico.

Así, al realizar el seguimiento de la concentración bacteriana se obtienen curvas de desinfección características de concentración de bacterias viables totales contra el tiempo de desinfección. En un gran número de investigaciones se ha observado que dichas curvas presentan tres zonas importantes. La primera es llamada hombro y en esta se observa una disminución lenta de la concentración bacteriana ya que en el tiempo inicial de la reacción se presenta cierta resistencia bacteriana al ataque de las especies oxidantes. En la segunda zona se da un decrecimiento exponencial en el que las bacterias inician su muerte rápida después de haber alcanzado un umbral límite de daño necesario, y finalmente una zona de inhibición debida a los subproductos de la reacción, comúnmente llamada cola (Dalrymple *et al.*, 2008; Marugán *et al.*, 2008; Salih, 2003). La continuidad de cada zona en el tiempo es modificada por las variables del proceso de DFA, como lo son la irradiación absorbida por el fotocatalizador, la composición de la matriz de agua, la concentración y/o fotocatalizador, la temperatura, aireación, agitación, geometría del reactor, pH, temperatura y el tipo de microorganismo que interviene en el proceso entre otras. (Benabbou *et al.*, 2007; Rincón *et al.*, 2003, 2004a, 2004b; Castro *et al.*, 2009). De aquí la importancia de un modelo cinético que se ajuste y que tenga en cuenta las variables de la DFA (Labas *et al.*, 2005; Marugán *et al.*, 2008).

En este trabajo se realizó un análisis del efecto de las variables del proceso de DFA con *E. coli* ATCC 11229 sobre los parámetros de un modelo cinético tipo Langmuir-Hinshelwood ajustado al proceso de desinfección por Marugán *et al.* (2008). Inicialmente se estudió el comportamiento bacteriano durante la DFA, para lo cual se realizaron medidas experimentales de las bacterias totales (C_T : lastimadas y no lastimadas) en el medio de cultivo enriquecido Agar Recuento y de las no lastimadas en el medio selectivo Agar MacConkey. En este último están presentes cristal violeta y sales biliares que inhiben el crecimiento de las bacterias lastimadas, debido a que al no tener su estructura metabólica en buen estado no toleran las sales biliares, ni realizan la fermentación de lactosa presente en la *E. coli* (Packer *et al.*, 1995). Adicionalmente, con las mediciones anteriores se validó el modelo, para lo cual se calcularon predicciones del nivel de daños en la población bacteriana utilizando una integración de Runge-Kutta de quinto orden simultáneamente con la regresión no-lineal de Gauss-Newton y se compararon con las medidas experimentales. Posteriormente, se analizó el efecto de la concentración de TiO_2 y la potencia de irradiación sobre la cinética, en este caso se utilizaron mediciones de la concentración de bacterias totales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Crecimiento bacteriano

Se utilizó la cepa *E. coli* ATCC 11229. Se realizó un crecimiento previo de *E. coli* en Agar Recuento (ARC, Merck) utilizando el método de siembra por estría para obtener colonias aisladas, de las cuales se tomaron dos con un asa previamente esterilizada y se inocularon en 10 mL de medio nutritivo Luria Bertani (LB; triptona: Oxoid, al 1% p/v; extracto de levadura: Oxoid, al 0,5% p/v y NaCl: Carlo Erba, al 1% p/v). El inóculo se mantuvo por 2,5 h en agitación constante a 120 rpm y $35\pm 2^\circ\text{C}$ y seguidamente éste se adicionó a 90 mL de LB y se mantuvo a las mismas condiciones de temperatura y agitación por 10 h hasta alcanzar la fase estacionaria de crecimiento para las poblaciones usadas en el proceso de DFA. Durante el crecimiento bacteriano se tomaron muestras cada 30 min, las cuales se diluyeron en solución salina (0,85% p/v de NaCl) y se sembraron en el medio de cultivo enriquecido ARC y en el medio selectivo Agar MacConkey (AMC; Oxoid) con el fin de observar las fases del crecimiento y analizar el comportamiento de la *E. coli* en ambos medios de cultivo.

Pruebas de desinfección fotocatalítica

Las pruebas de DFA se llevaron a cabo en frascos de borosilicato con 50 mL de agua destilada y esterilizada, TiO_2 (Degussa P-25) como fotocatalizador y 1 mL de suspensión bacteriana en estado estacionario del crecimiento. Para preparar esta suspensión se tomó una muestra de 2 mL de cultivo en fase estacionaria (10 h de crecimiento) y se centrifugó a 3000 rpm durante 10 min, el *pellet* másico obtenido se lavó dos veces con solución salina, posteriormente se volvió a suspender en 1 mL de agua destilada. El sistema de reacción se irradió durante 60 min en una cámara *suntest* (CPS+, ATLAS), con temperatura controlada a 35°C e irradiación entre 300 y 800 nm con 7% de los fotones emitidos entre 300 y 400 nm, simultáneamente se mantuvo con agitación magnética a 4000 rpm. Durante la desinfección se tomaron muestras cada 10 min, las cuales se diluyeron en serie por medio de un procedimiento estándar (Madigan *et al.*, 2009). Cada dilución decimal se sembró por duplicado en microplaca en ARC y posteriormente fueron incubadas a $35\pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 h, luego se realizó el conteo de colonias viables que se expresó en Unidades Formadoras de Colonias por unidad de volumen (UFC/mL). Para comparar los niveles de daño predichos con el modelo cinético y determinados experimentalmente, las muestras fueron sembradas también en AMC. Se realizaron tres tipos de experimentos: el estudio del comportamiento bacteriano durante la desinfección a partir de niveles de daños sucesivos y la validación del modelo cinético empleando una concentración de TiO_2 de 0,25 g/L y una potencia de irradiación de 400 W/m^2 , posteriormente se varió la concentración de TiO_2 de 0,05 a 1 g/L usando una potencia de irradiación de 250 W/m^2 , y finalmente se varió la potencia de irradiación, se utilizaron 250, 400 y 550 W/m^2 con una concentración de TiO_2 de 0,1 g/L.

Modelo Cinético

Se utilizó un modelo cinético (Ec. 1 y 2) tipo Langmuir-Hinshelwood (Marugán *et al.*, 2008), basado en el mecanismo de reacción de inactivación de bacterias por una serie de eventos sucesivos propuesto por Severín *et al.* (1983)

$$\frac{dC_{NL}}{dt} = -k \frac{KC_{NL}^n}{1 + KC_{NL}^n + C_L^n} \quad (1)$$

$$\frac{dC_L}{dt} = -k \frac{KC_{NL}^n - KC_L^n}{1 + KC_{NL}^n + C_L^n} \quad (2)$$

Donde: C es la concentración de bacterias, ya sean lastimadas (C_L) o no lastimadas (C_{NL}), k es la constante de velocidad de desactivación, K la constante de interacción bacteria-fotocatalizador, y n es el coeficiente de inhibición bacteriano, u orden de reacción. La interacción entre el TiO_2 y la bacteria es debida al efecto de los radicales oxidantes generados en la DFA, lo que ocasiona diversos daños sobre la pared celular hasta causar muerte del microorganismo (eventos sucesivos) debido a la descomposición de los AGP. Se asume que dicha interacción es la misma durante la DFA, tanto para las bacterias no lastimadas como para las lastimadas (Marugán *et al.*, 2008). La estimación de los parámetros cinéticos se realizó partiendo de medidas experimentales de la relación (C_T/C_0) entre la concentración de bacterias totales en cualquier momento (C_T) y la de las iniciales (C_0), por medio de un algoritmo iterativo, usando el método de regresión no lineal de Gauss-Newton simultáneamente con una integración numérica de Runge-Kutta de quinto orden para predecir C_L y C_{NL} . Las medidas experimentales de la concentración de bacterias lastimadas y no lastimadas no sólo permite un análisis y observación del comportamiento bacteriano durante el proceso de DFA y del umbral de daño limite necesario para la inactivación, sino también el estudio de la efectividad del modelo cinético para predecir el comportamiento bacteriano durante la desinfección realizando las respectivas comparaciones de dichas mediciones con las concentraciones predichas con el modelo cinético.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Seguimiento del crecimiento bacteriano

La Fig. 1. muestra las curvas de crecimiento de la *E. coli* seguidas con los medios de cultivo, el enriquecido ARC y el selectivo AMC. Se observa las tres fases características: de adaptación (0-1 h), crecimiento exponencial (1-3 h) y estacionaria (después de 3 h) (Ramírez *et al.*, 2005). Se puede ver que durante el crecimiento no hay diferencias significativas entre las colonias determinadas en ARC y en AMC. Esto se debe a que en las bacterias no hay daños provocados por estrés oxidativo y/o factores externos que podrían inhibir el crecimiento en el medio selectivo y el comportamiento es el mismo que en el ARC, en el cual no hay inhibidores del crecimiento. Así se asegura que en el inicio del proceso de DFA no habrá poblaciones lastimadas.

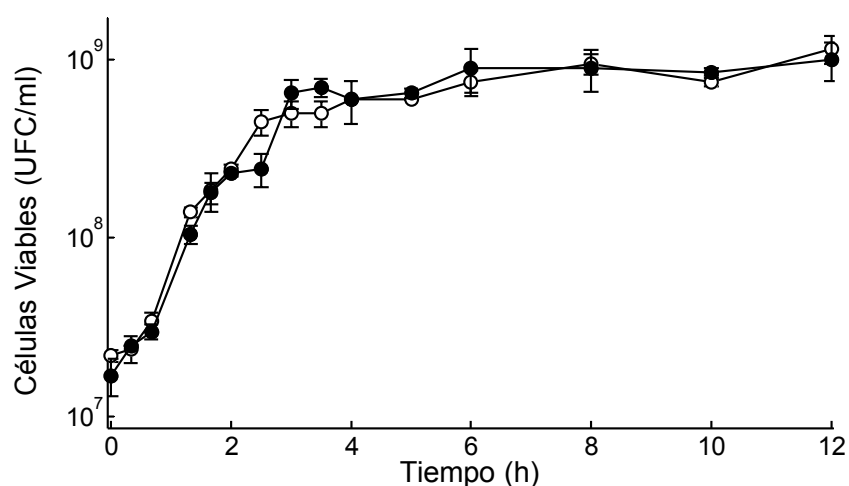


Fig. 1. Curvas de crecimiento de la *E. coli* ATCC 11229. (○) Medida en Agar Recuento y (●) medida en Agar MacConkey. Las barras corresponden al error estándar calculado para cuatro conteos bacterianos independientes.

Adicionalmente, hay que tener en cuenta que la desinfección bacteriana es más lenta en la fase estacionaria del crecimiento, puesto que en esta inicia la disminución de los nutrientes y por lo tanto las bacterias acumulan reservas, reorganizan su metabolismo, aumentan su movilidad, y reestructuran su envoltura celular conllevando a un aumento en la viabilidad y una mayor resistencia a: factores de estrés oxidativo, la radiación ultravioleta, el calor etc. (Ramírez *et al.*,

2005). Por consiguiente, las poblaciones bacterianas utilizadas para el proceso de DFA fueron obtenidas durante la fase estacionaria del crecimiento.

Seguimiento bacteriano durante el proceso de DFA utilizando medios selectivos

La Fig. 2 muestra la variación de las concentraciones de *E. coli* no lastimadas (2a) y lastimadas (2b) durante la DFA calculadas con el modelo cinético y medidas con el medio selectivo: Agar MacConkey, y enriquecido: Agar Recuento. En la Fig. 2a se puede observar una disminución exponencial de la cantidad de bacterias no lastimadas hasta los 40 min, después de los cuales las bacterias aparentemente han alcanzado un nivel crítico de daño que no les permite recuperarse en el AMC (Inactivación aparente). Simultáneamente y contrario a lo anterior, la concentración de bacterias lastimadas (Fig. 2b) aumentan hasta llegar a una concentración de alrededor de 10^5 UFC/mL, después de la cual inicia una disminución exponencial. Es probable que, durante los primeros 10 min, se haya alcanzado un nivel de daño (Severín *et al.*, 1983) para la población en general después del cual su crecimiento en el AMC se inhibe y se inicia una desactivación irreversible. En este periodo, los $\cdot\text{OH}$ producidos atacan las moléculas más externas de la membrana, generando un subsecuente rompimiento de enlaces, y finalmente se alcanza la lisis celular. De esta manera, el nivel de daños crítico se alcanza a medida que se llega a la total descomposición lipídica. No obstante, la velocidad y tiempo requerido para llegar al umbral límite también dependerá de la velocidad en que se lleve a cabo la descomposición de la membrana.

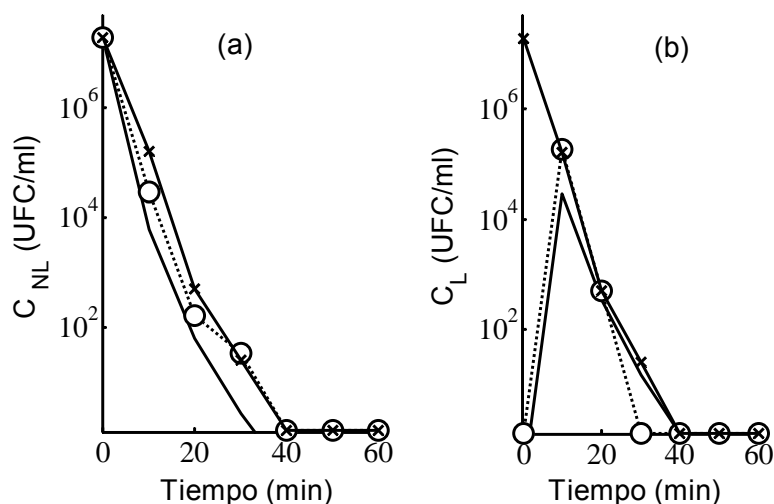


Fig. 2. DFA a 400 w/m^2 y $0,25 \text{ g/L}$ de TiO_2 con poblaciones de *E. coli* ATCC 11229: (a) no lastimadas (\circ) y (b) lastimadas (\odot). Predicciones del modelo (—). Concentración de bacterias totales (\times).

Cabe resaltar el hecho de que el umbral límite de daños requeridos para que la inactivación bacteriana, se produzca, está directamente relacionado con la velocidad a la que ocurre la peroxidación lipídica, y por consiguiente también, con la cantidad de especies oxidantes existentes en cada instante. Por lo tanto, al realizar modificaciones en: la cantidad de catalizador, la potencia de irradiación o la matriz de agua utilizada etc. se modificará el tiempo necesario para alcanzar un nivel de daño tal que conlleve a la inactivación de las poblaciones bacterianas.

Por otra parte, en la Figura 2b se puede ver que después de los 10 min de la reacción, la concentración de bacterias lastimadas (trazo \odot) presenta un rápido decrecimiento. Esto es debido a que durante los primeros minutos de desinfección las bacterias pueden presentar cierto nivel de resistencia al ataque oxidante gracias a sus mecanismos de defensa. Finalmente, después de los 40 min de desinfección el nivel de daños, provocados por los $\cdot\text{OH}$ generados en la irradiación de la suspensión de TiO_2 , hace que se sobrepase el umbral límite de daños para la población en general, de modo tal que se imposibilita el crecimiento bacteriano en ARC. Castro *et al.* (2009) observaron que si la suspensión bacteriana, tratada en la DFA con TiO_2 , se somete a un periodo de oscuridad las bacterias lastimadas pueden regenerarse y recuperar parte de la población inicial. Por consiguiente, la desactivación observada a 40 min de irradiación (Figs. 2a y

2b) es una inactivación aparente, en la cual las bacterias presentan un estado de latencia, en el que se necesita un tiempo adicional de irradiación para alcanzar la efectiva inactivación de las células.

En las Figs. 2a y 2b, también se puede observar que las concentraciones de bacterias no lastimadas y lastimadas, predichas por el modelo cinético estudiado, se ajustan de manera muy precisa a los resultados experimentales, por lo cual se podría decir que el modelo modificado de Langmuir-Hinshelwood permite la expresión matemática y/o determinación de las bacterias lastimadas en cada instante de tiempo durante el proceso de desinfección. Así mismo, la medición experimental de las bacterias lastimadas con medios selectivos permitiría la comparación del efecto de diversas variables de operación en el umbral límite de daño bacteriano que se obtiene en los periodos iniciales de la desinfección. Adicionalmente, es importante resaltar que la determinación de los parámetros cinéticos es más precisa si el ajuste matemático se realiza a partir de datos experimentales individuales de concentración de bacterias lastimadas y no lastimadas, medidos con AMC y ARC como se sugiere en este trabajo, ya que se reducen los grados de libertad del sistema matemático de ecuaciones diferenciales.

Efecto de la variación en la concentración de TiO_2 y la potencia de irradiación sobre la cinética de desinfección

En la Fig. 3 se presentan las curvas de DFA con *E. coli* ATCC11229 durante 60 min de irradiación para concentraciones de TiO_2 (g/L) en suspensión de 0 a 0,25 g/L a una potencia constante de $250 W/m^2$.

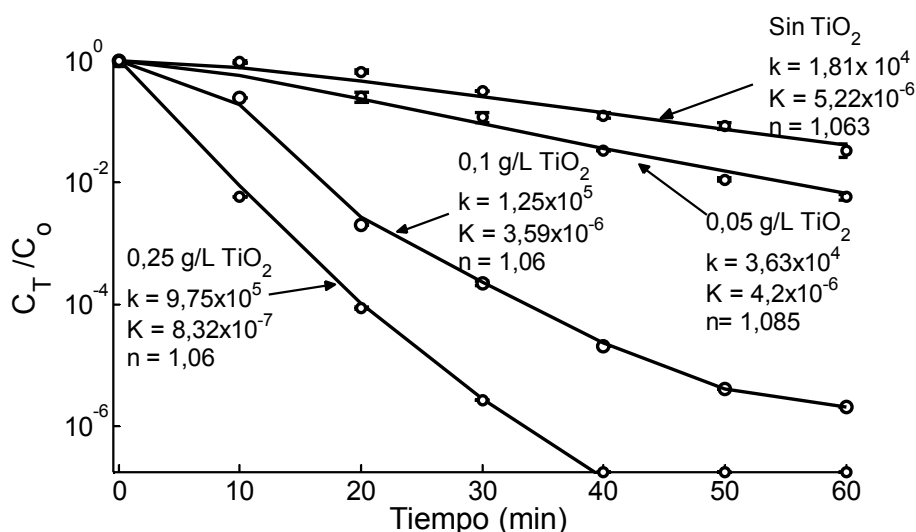


Fig. 3. Influencia de la concentración de TiO_2 en la DFA con poblaciones de *E. coli* ATCC 11229 a $250 W/m^2$ de irradiación: (○) datos experimentales, (—) predicción del modelo. Barras de error estándar calculadas para cuatro conteos independientes.

En esta figura se observa un aumento de la velocidad de inactivación fotocatalítica con el incremento en la concentración de fotocatalizador. Sin embargo, pequeñas concentraciones de TiO_2 de alrededor de 0,05 g/L no causan efectos significativos en la velocidad de desactivación con respecto al sistema sin fotocatalizador. Adicionalmente, durante los primeros 10 min de irradiación se observa una disminución de la velocidad de inactivación a una concentración de 0,1 g/L, formándose un pequeño hombro en las curvas de desinfección. Lo anterior se debe posiblemente a que con pequeñas concentraciones de TiO_2 los mecanismos de protección de las bacterias son capaces de contrarrestar el daño celular causado por las especies oxidantes y en consecuencia se requiere la acumulación de daños sucesivos para poder alcanzar el umbral límite de daños. Entonces, es posible afirmar que al sobrepasar la concentración de fotocatalizador de 0,1 g/L la resistencia disminuye notoriamente, de acuerdo al nivel de inclinación del hombro al inicio de las curvas de desinfección en la Fig. 3. Esto indica, que los mecanismos de recuperación bacteriana no son capaces de contrarrestar el efecto oxidativo generado por los $\cdot OH$ producidos

por el TiO_2 cuando se sobrepasa una concentración de 0,1 g/L. Por consiguiente, el decaimiento logarítmico inicia desde el primer instante de la reacción de desinfección por lo que no se observa la presencia de un hombro pronunciado en la curva de desinfección para el caso de 0,25 g/L de TiO_2 .

Por otra parte, en el caso de la concentración de 0,1 g/L de TiO_2 se observa disminución en la velocidad de desactivación en los últimos 10 min donde se puede ubicar la zona de "cola" de la desinfección. Algunos autores sugieren que este comportamiento se debe al aumento de compuestos producidos por la lisis bacteriana, los cuales compiten por las especies oxidantes y causan protección a las bacterias no lastimadas, de modo que no son atacadas efectivamente y pueden regenerarse en ARC para su posterior conteo (Coleman *et al.*, 2005; Benabbou *et al.*, 2007).

En la Fig. 4 se presentan las curvas de DFA con *E. coli* ATCC11229 durante 60 min de irradiación para una concentración de 0,1 g/L de TiO_2 con tres diferentes potencias.

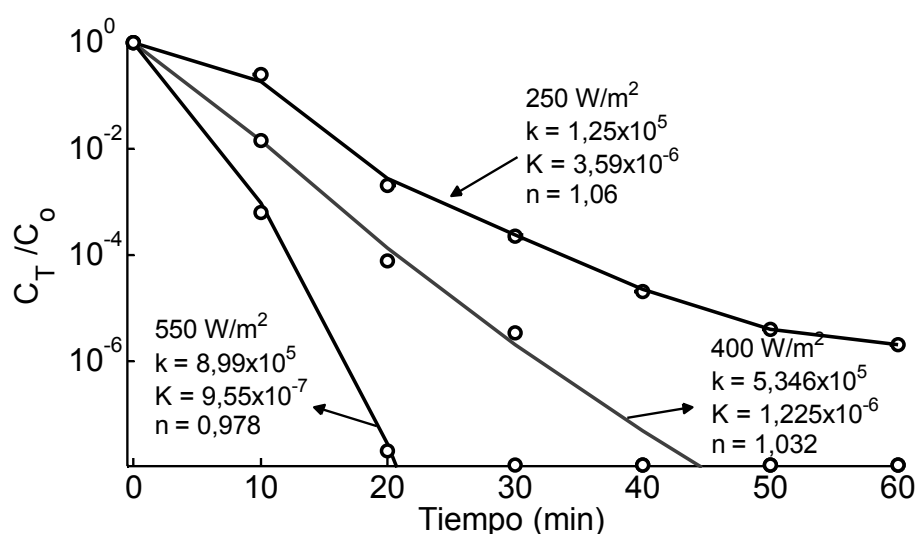


Fig. 4. Influencia de la potencia de irradiación sobre los parámetros cinéticos de la DFA: datos experimentales (\circ), predicción del modelo ($-$).

En concordancia, al igual que con el aumento en la concentración de TiO_2 , se observa que al aumentar la potencia de irradiación, a concentración de fotocatalizador y temperatura constantes, del mismo modo aumenta la velocidad de inactivación fotocatalítica, pues en este caso dicho cambio también repercute directamente en la cantidad de especies oxidantes producidas (Rincón *et al.*, 2003, 2004a, 2004b; Hoerter *et al.*, 2005; Nadochenko *et al.*, 2006). Consecuentemente, también hay una potencia de irradiación con la que se sobrepase el umbral límite de daños que aumenta la velocidad de desactivación.

En la Fig. 5 se presenta la influencia de la concentración de fotocatalizador con una potencia de irradiación de 250 W/m^2 sobre los tres parámetros cinéticos obtenidos mediante el ajuste de las ecuaciones (1) y (2) a partir de datos experimentales de C_T durante la DFA. Al igual que en las Figs. 3 y 4, se observa que al aumentar la concentración del fotocatalizador y la potencia de irradiación aumenta el valor de la constante de desactivación, k , mientras que el de K disminuye. Sin embargo, a concentraciones de fotocatalizador entre 0,25 y 1 g/L no hay variaciones significativas tanto de k ni de K . Esto sugiere que para una misma concentración inicial de bacterias de alrededor de 10^7 UFC/mL , se alcanza el umbral límite de daño, desde el inicio de la reacción, cuando se irradia una suspensión de 0,25 g/L de TiO_2 a una potencia de 250 W/m^2 . En el caso de concentraciones menores a 0,25 g/L se requiere un mayor tiempo de interacción bacteria-fotocatalizador para alcanzar dicho nivel de daños. A lo anterior, se suma la presencia del efecto pantalla ocasionado por el aumento de partículas en suspensión que hace que los valores de k y K permanezcan constantes. Benabbou *et al.* (2007), en estudios de desinfección con *E. coli* K12, atribuyen dicho comportamiento a la limitación de la difusión de fotones hasta la superficie de

las partículas de fotocatalizador, lo que inhibe la generación del par electrón-hueco fotogenerado necesario para la generación de especies oxidantes. Otros autores han encontrado este comportamiento para concentraciones por encima de 0,1 g/L (Marugán *et al.*, 2008) o 1 g/L (Rincón *et al.*, 2003).

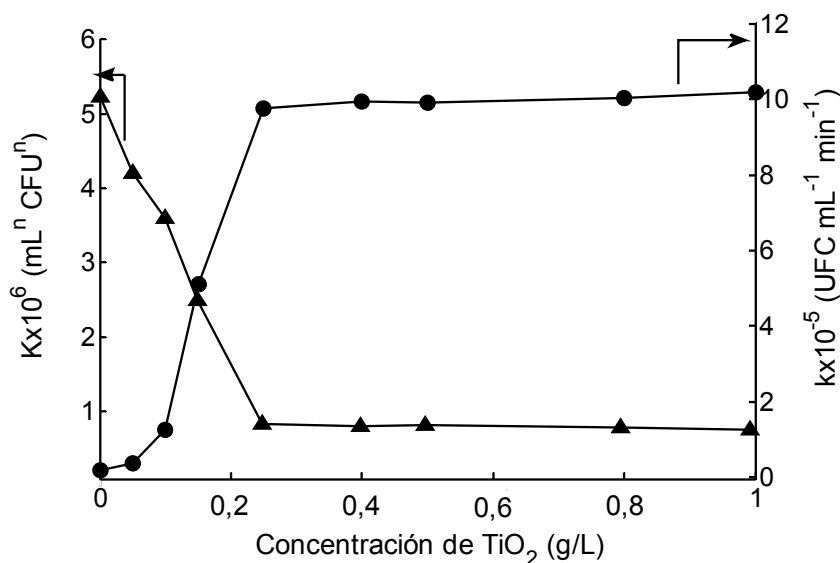


Fig. 5. Influencia de la concentración de TiO₂ sobre la constante de interacción bacteria-fotocatalizador (K) (▲) y la constante de velocidad (k) (●) de la DFA con *E. coli* ATCC 11229.

Finalmente, es necesario discutir el parámetro n que hasta hoy en día a sido relacionado con la cola característica el final de las curvas de desinfección (Marugán *et al.*, 2008), observado en la Fig. 3 con una concentración de TiO₂ de 0.1 g/L. Ésta zona está determinada por variables del proceso como concentración de TiO₂, potencia de irradiación y concentración de residuos subproducto de la desinfección. En la Figs. 3 y 4 se observa que el parámetro n no presenta cambios significativos, ni dependencia de la concentración de TiO₂ ni de la potencia de irradiación, en los intervalos analizados y presenta valores alrededor de $1,06 \pm 0,02$. El hecho de que la cola no esté determinada por las anteriores variables, sugiere que el parámetro n depende del efecto pantalla ocasionado por los subproductos de la desinfección (Coleman *et al.*, 2005; Nadochenko *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

El modelo cinético Langmuir-Hinshelwood de tres parámetros permite el ajuste y modelamiento de las curvas de inactivación de la *E. coli* ATCC 11229 en procesos de desinfección fotocatalítica de agua, para las condiciones estudiadas, puesto que se ajusta a las curvas de inactivación experimentales.

La medición en medios selectivos de la concentración de bacterias lastimadas y no lastimadas, durante el proceso de desinfección, permite la determinación experimental del umbral límite de daños necesarios para alcanzar la inactivación bacteriana. Adicionalmente, esta medición experimental facilita la resolución matemática del modelo Langmuir-Hinshelwood estudiado.

Se encontró que ante el aumento de la concentración de fotocatalizador y de la potencia de irradiación, el coeficiente de interacción bacteria-fotocatalizador disminuye y la constante de velocidad de desactivación aumenta. Lo anterior se refleja en la disminución de la presencia del hombro, característico en las curvas de desinfección, de acuerdo al aumento en las especies oxidantes que permiten alcanzar en menor tiempo el nivel de daño necesario sobrepasando la resistencia bacteriana y alcanzando la inactivación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS, al SENA y a la UIS por la financiación del proyecto código: 1102341-19419, y al grupo GIMBA-UIS por su colaboración. Andrea Moreno agradece a COLCIENCIAS y la UIS por las becas recibidas para sus estudios de Maestría en Ing. Química.

REFERENCIAS

Benabbou, A.K., y otros tres autores. *Photocatalytic inactivation of Escherichia coli Effect of concentration of TiO₂ and microorganism, nature, and intensity of UV irradiation*. Appl. Catal. B: Environ 76(3-4), 257- 263 (2007).

Castro, C.A., y otros tres autores. *Degradación heliofotocatalítica de Escherichia coli en sistemas tipo desinfección SODIS con dióxido de titanio modificado*. Inf. Tecnol. 20(6) 29-36 (2009).

Coleman, H.M., y otros cuatro autores. *Bactericidal effects of titanium dioxide-based photocatalysts*. J. Chem. Eng 113(1) 55-63 (2005).

Dalrymple O. K., y otros tres autores. *A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection*. Appl. Catal. B: Environ 98 (1-2), 27-38 (2010).

Hoerter, J.D., y otros nueve autores. *Effects of sublethal UVA irradiation on activity levels of oxidative defense enzymes and protein oxidation in Escherichia coli*. J. Photochem. Photobiol. A: Chem 81(3), 171-180 (2005).

Marugán, J. y otros tres autores. *Kinetics of the photocatalytic disinfection of Escherichia coli suspensions*. Appl. Catal. B: Environ 82(1-2), 27-36 (2008).

Labas, M.D., C.A. Martín y A.E. Cassano. *Kinetics of bacteria disinfection with UV radiation in an absorbing and nutritious medium*. Chem. Eng. J. 114(1-3), 87-97 (2005).

Madigan, M., J.M. Martinko y J. Parker. *Brock: Biología de los microorganismos*. 12^a edición. Pearson Prentice Hall (2009).

Maness P-C. y otros cinco autores. *Bactericidal Activity of Photocatalytic TiO₂ Reaction: toward an Understanding of Its Killing Mechanism*. Appl. Environ. Microbiol 65(9), 4094-4098 (1999).

Nadtochenko, V. y otros cinco autores. *Kinetic spectroscopy of the interfacial charge transfer between membrane cell walls of E. coli and TiO₂*. J. Photochem. Photobiol. A: Chem 181(2) 401-407 (2006).

Packer, P.J., y otros tres autores. *Comparison of selective agars for the isolation and identification of Klebsiella oxytoca and Escherichia coli from environmental drinking water samples*. Lett. Appl. Microbiol 20(5), 303-307 (1995).

Ramirez, J., G. Contreras y M.C.C. Gómez. *La fase estacionaria en la bacteria Escherichia coli*. Rev. Latinoam. Microbiol 47(3-4), 92-101 (2005).

Rincón, G. y C. Pulgarín. *Photocatalytical inactivation of E. coli: effect of (continuous-intermittent) light intensity and of (suspended-fixed) TiO₂ concentration*. Appl. Catal. B: Environ 44(3), 263-284 (2003).

Rincón, G y C. Pulgarín. *Bactericidal action of illuminated TiO₂ on pure Escherichia coli and natural bacterial consortia: post-irradiation events in the dark and assessment of the effective disinfection time*. Appl. Catal. B: Environ 49(2), 99-112 (2004a).

Rincón, G. y C. Pulgarín. *Field solar E. coli inactivation in the absence and presence of TiO₂: is UV solar dose an appropriate parameter for standarization of water solar disinfection?* Solar Energy 77(5), 635-648 (2004b).

Rincón, A.G., S.A. Giraldo y C. Pulgarín. *Desinfección de agua por fotocátalisis. Aspectos Básicos*, in: *En Solar Safe Water*. Ed. M. Blesa y J. Blanco. Buenos Aires (2005).

Rizzo, L. *Inactivation and injury of total coliform bacteria after primary disinfection of drinking water by TiO₂ photocatalysis*. J. Hazard. Mater. 165(1-3), 48-51 (2009).

Salih, F.M., *Formulation of a mathematical model to predict solar water disinfection*. Water. Res. 37(16), 3921-3927 (2003).

Severin, B y M.S.R. Engelbrecht. *Kinetic modeling of U.V disinfection of water*. Water. Res 17, 1669-1678 (1983).

Sichel, C., y otros tres autores. *Effect of UV solar intensity and dose on the photocatalytic disinfection of bacteria and fungi*. Catalysis Today 129(1-2),152-160 (2007).

Srinivasan, C. y N. Somasundaran. *Bactericidal and detoxification effects of irradiated semiconductor catalyst, TiO₂*. Current Science 85(10), 1431-1438 (2003).