

**Artículo Original**

**DEFINICIÓN DE LA LEY DE VELOCIDAD PARA LA REACCIÓN  
ENTRE LAS AGUAS RESIDUALES TEXTILES  
Y DIÓXIDO DE CARBONO**

**DEFINITION OF THE RATE LAW FOR THE REACTION BETWEEN TEXTILE  
WASTEWATER AND CARBON DIOXIDE**

Mercedes Arbona Cabrera<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1096-7648>

Isabel Cabrera Estrada<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5307-1502>

José Antonio Fabelo Falcón<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2144-6701>

María Eugenia O' Farrill Pie<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6451-3065>

María de los Ángeles García Hernández<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4361-8850>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> UB "Desembarco del Granma". Carretera a Camajuaní km 2 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Septiembre 30, 2022; Revisado: Octubre 3, 2022; Aceptado: Octubre 10, 2022

**RESUMEN**

**Introducción:**

Las aguas residuales alcalinas son un subproducto de muchas industrias textiles. Se requiere un ajuste del pH mediante la adición de productos ácidos. Al determinar la cinética de la reacción de neutralización entre esas aguas y el CO<sub>2</sub> el sistema de tratamiento concebido será más eficiente.

**Objetivo:**

Definir la ley de velocidad para la reacción entre las aguas residuales textiles y el dióxido de carbono en la UB "Desembarco del Granma".

**Materiales y Métodos:**

Se empleó agua residual del proceso textil y CO<sub>2</sub>. Se realizaron experimentos en un reactor discontinuo. Se utilizó el método integral de análisis de datos cinéticos y pruebas de hipótesis no paramétricas.

**Resultados y Discusión:**

El pH básico del efluente a la planta se debe al uso de NaOH en los procesos textiles. Dos pruebas de hipótesis no paramétricas para los valores de las constantes de velocidad



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

\* Autor para la correspondencia: Mercedes Arbona, E-mail: [marbona@uclv.cu](mailto:marbona@uclv.cu)



específica de la reacción ( $k$ ) reflejaron desviaciones estándares de 0,171 y 0,76 respectivamente, superiores a 0,05, por lo que no existen diferencias significativas entre los cuatro grupos considerados para cada temperatura. Con la prueba de hipótesis no paramétrica para  $k$  a 50 y 30 °C, el nivel de significación (0,001) corroboró la dependencia de cada  $k$  con la temperatura.

**Conclusiones:**

Las constantes de velocidad específica para las temperaturas de 30°C y 50°C determinadas son 57,98 y 105,94 L/(mol s) respectivamente para la reacción de neutralización del agua residual textil con CO<sub>2</sub>. La reacción es de orden 2, presenta un valor de energía de activación de 24,5 kJ/mol.

**Palabras clave:** aguas residuales; dióxido de carbono; ley de velocidad.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

Alkaline wastewater is a by-product of many textile industries. A pH adjustment is required by the addition of acidic products. By determining the kinetics of the neutralization reaction between these waters and CO<sub>2</sub>, the conceived treatment system will be more efficient.

**Objective:**

Define the rate law for the reaction between textile wastewater and carbon dioxide in the UB “Desembarco del Granma”.

**Materials and Methods:**

Residual water from the textile process and CO<sub>2</sub> were used. Experiments were carried out in a batch reactor. The integral method of kinetic data analysis and non-parametric hypothesis tests were used.

**Results and Discussion:**

The basic pH of the effluent to the mill is due to the use of NaOH in textile processes. Two non-parametric hypothesis tests for the values of the reaction-specific rate constants ( $k$ ) reflected standard deviations of 0.171 and 0.76 respectively, higher than 0.05, so there are no significant differences between the four groups considered for each temperature. With the non-parametric hypothesis test for  $k$  at 50 and 30 °C, the level of significance (0.001) corroborated the dependence of each  $k$  with temperature.

**Conclusions:**

The specific rate constants for the temperatures of 30°C and 50°C determined are 57.98 and 105.94 L/(mol s) respectively for the neutralization reaction of the textile wastewater with CO<sub>2</sub>. The reaction is of order 2 presents an activation energy value of 24.5 kJ/mol.

**Keywords:** sewage water; carbon dioxide; speed law.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua aprovechable para el uso humano y el mantenimiento de los ecosistemas es una cifra realmente baja, y solo alcanza el 0,7 % del volumen total (200 mil km<sup>3</sup> entre

superficial y subterránea) según Duque, (2018). De aquí se deriva la importancia en el cuidado y control que debe tenerse de la contaminación que puede producirse en los cuerpos receptores.

El uso desmedido de ciertos recursos, la ausencia de una protección o debido control generalizado en el ambiente o la incapacidad de los procesos e instalaciones existentes para ello, ha traído como consecuencia un incremento en la contaminación de la biosfera terrestre (Romero y col., 2016).

En el caso de las aguas residuales industriales, un pH de vertido superior a 9 está prohibido habitualmente, tal como lo regula la norma cubana, NC. 27, (2012). Por todo ello, en multitud de ocasiones es necesario regular el pH del agua en cuestión. Dicha regulación irá en función de las características del agua y siempre se tratará mediante reacciones de neutralización, o ácido-base.

La industria textil utiliza grandes cantidades de agua en etapas, como el pretratamiento, el blanqueo, el teñido y el estampado, que demandan aproximadamente de 100 a 200 L de agua de alta calidad por kilogramo de producto textil y, en consecuencia, generan gran volumen de agua residual de tintura. Buscar un método efectivo para tratar y reutilizar las aguas residuales de la industria textil es un gran desafío (Hua y col., 2019). Las etiquetas ecológicas para los productos textiles y las restricciones más estrictas sobre las descargas de aguas residuales están obligando a los procesadores húmedos de textiles a reutilizar el agua y los productos químicos del proceso.

Las aguas residuales alcalinas son un subproducto de muchas industrias textiles. Por lo tanto, deben neutralizarse antes de enviarlas a una planta de tratamiento biológico o descargarlas en una alcantarilla según lo reportado por Yaseen y Scholz, (2019). Se requiere un ajuste del pH mediante la adición de productos ácidos como HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> o CO<sub>2</sub>. El reactivo de neutralización (ácido) utilizado debe satisfacer esencialmente características económicas y técnicas. Se recomienda que sea compatible con los compuestos del efluente, para mejorar las condiciones para los tratamientos posteriores y no implicar una no conformidad con las normas. De hecho, el dióxido de carbono se usa cada vez más para neutralizar las aguas de proceso alcalinas en muchas industrias. Es necesario determinar la cinética de la reacción de neutralización entre las aguas residuales textiles y el dióxido de carbono para poder concebir un sistema de tratamiento que esté en concordancia con la rapidez de la reacción, con lo que el proceso será más eficiente.

Se puede concebir la rapidez de reacción como una multiplicación de dos funciones de variables independientes (temperatura y composición). La función de la temperatura se describe como constante de velocidad (k), aquí se incluye la reactividad de las moléculas, que depende de la temperatura y la presencia del catalizador. Existen relaciones simples entre las concentraciones y la rapidez de reacción, como la ley de potencias, que se obtienen del ajuste de los datos experimentales; en estas relaciones, los órdenes de reacción pueden o no coincidir con los coeficientes estequiométricos. Tienen la ventaja de que son fáciles de determinar, pero solo son confiables dentro del intervalo donde se obtuvieron los datos experimentales de acuerdo con Villarreal y Cuevas-García, (2021).

En la literatura, según varios autores (Pohoreckl y Moniuk, 1988), (Haubrock y col., 2007), la cinética de la reacción 1 generalmente se describe usando una reacción

irreversible de segundo orden que aparece representada en 2.



$$r = k_1 * c(CO_2) * c(NaOH) \quad (2)$$

donde:

$k_1$ : constante específica de velocidad de reacción (L/mol s).

r: velocidad de reacción (mol/L s).

c ( $CO_2$ ): concentración de dióxido de carbono para diferentes tiempos (mol/L).

c (NaOH): concentración de NaOH para diferentes tiempos (mol/L).

Todos los posibles efectos de no idealidades se agrupan en la constante de velocidad de reacción  $k_1$ . Este enfoque es suficiente para representar los datos experimentales de un solo estudio específico.

La composición de las aguas residuales de la industria textil varía de país a país, dependiendo del proceso, el equipo utilizado en la fábrica, tipo de tejido producido, productos químicos aplicados, el peso de la tela, época del año. El sector textil es uno de los grandes contribuyentes al deterioro del entorno. Los principales impactos ambientales relacionados con esta industria tienen que ver con las aguas residuales que genera y con la carga química que las mismas contienen, (Córdova y col., 2020).

Por todo lo anterior, esta investigación tiene como propósito definir la ley de velocidad para la reacción entre las aguas residuales textiles y el dióxido de carbono en la UB “Desembarco del Granma”.

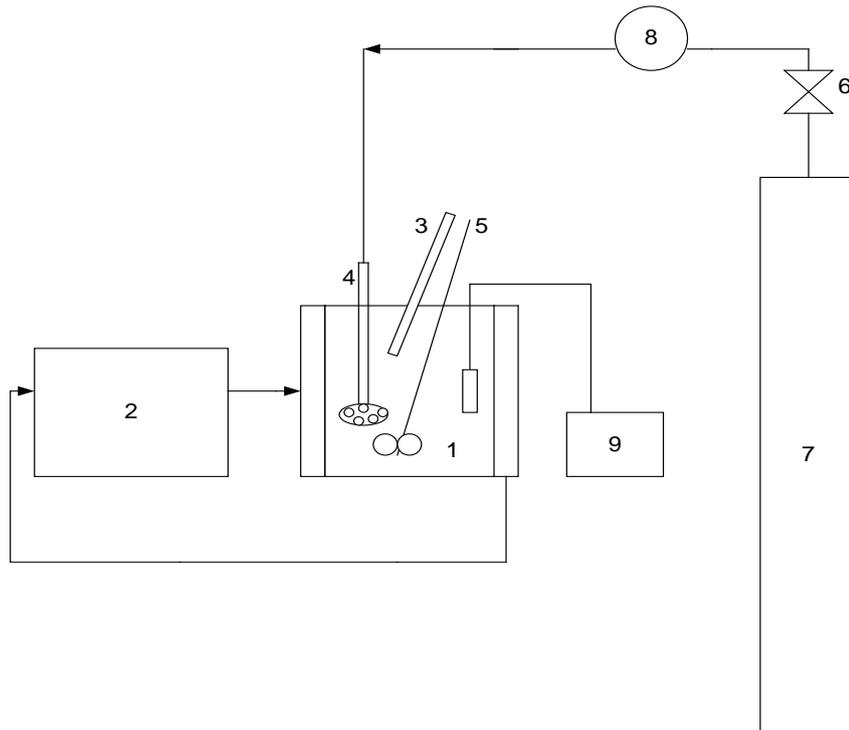
## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 *Materiales empleados*

Se empleó agua residual, obtenida por muestreo en la planta de tratamiento de residuales líquidos de la textilera “Desembarco del Granma”. Las muestras fueron compuestas, tomándose a intervalos de 1 hora durante 8 horas de trabajo. Al agua se le realizó una caracterización de parámetros físicos y químicos. Los procedimientos analíticos utilizados para ello, así como la simbología y unidades de medición, se corresponden con lo establecido por Baird y Eaton, (2017). Para realizar los ensayos de neutralización se empleó  $CO_2$  (g) suministrado por la Empresa Gases Industriales de Cuba.

Se estudió la reacción de neutralización entre las aguas residuales textiles y el dióxido de carbono. Se realizaron experimentos en un reactor discontinuo enchaquetado de vidrio (1), con un volumen de 2 litros, al cual se acopló un termostato (mlw-U15) (2), con el objetivo de regular la temperatura de la reacción de forma que garantizara las condiciones isotérmicas para cada experimento. Mediante un termómetro (3) introducido en el reactor se verificó el valor de la temperatura en cada ensayo. Se empleó un difusor (4) para burbujear el gas y un agitador de paletas (5). Estos dispositivos permiten lograr un mejor mezclado de los reaccionantes (Castillo, 2013) y la difusión del  $CO_2$  de forma que se disminuyan los defectos de mezclado, aguas muertas, vórtice. A través de una válvula (6) se controló el paso del  $CO_2$ , almacenado en un cilindro (7) hacia el reactor. La medición de la presión se llevó a cabo utilizando un manómetro GENE BRE (8) con una escala comprendida entre 0 y 600 kPa. Se midió el

pH de la disolución mediante un pH-metro “HANNA” (9). En la Figura 1 se muestra un esquema de esta instalación.



**Figura 1.** Esquema de la instalación experimental del reactor discontinuo empleado para la obtención de los datos cinéticos

## 2.2 Método usado para determinar la expresión cinética

Los métodos de obtención de datos cinéticos pueden ser químicos, físicos o de extracción de muestras. En este estudio se realiza el seguimiento y medición del pH como propiedad característica de fácil medición. En el diseño experimental se consideraron como variables independientes la temperatura, la presión y la agitación. El valor mínimo de temperatura seleccionado fue 30 °C porque las aguas residuales ingresan a la planta de tratamiento con valores entre 35 y 40 °C y los valores de temperatura promedios anuales de la localidad no sobrepasan los 30°C. Se consideró como valor máximo 50 °C teniendo en cuenta que la solubilidad del CO<sub>2</sub> (g) disminuye al aumentar la temperatura de acuerdo con Speight, (2002). La presión debe ser menor de 520 kPa para que el CO<sub>2</sub> se encuentre en estado gaseoso a la temperatura de trabajo según Perry, (1992) y pueda ser burbujeado al reactor. Se seleccionó el intervalo entre 100 y 300 kPa porque presiones elevadas implican un equipamiento más costoso.

Para obtener la expresión cinética existen diversos métodos; así se cuenta con: el método integral, el análisis diferencial y la regresión no lineal de acuerdo con lo reportado por Herrera, (2020). El método integral es el más rápido de todos para determinar la ley de velocidad si el orden de reacción está entre cero, uno o dos, el método también es útil para determinar los demás parámetros cinéticos de la ecuación de Arrhenius.

Para realizar el análisis de los datos obtenidos experimentalmente, con el objetivo de hallar la expresión de la ley de velocidad, se utilizó el método integral de análisis de datos cinéticos. Se empleó la ecuación 3, para la elección de la misma se tuvo en cuenta la relación de alimentación, así como la estequiometría.

$$\ln \frac{C_B C_{A0}}{C_{B0} C_A} = C_{A0}(M - 2)kt \quad M \neq 2 \quad (3)$$

Donde:

$C_{A0}$ : concentración inicial de NaOH (mol/L) (determinada a partir de medición de pH del agua residual a la entrada de la planta de tratamiento).

$C_{B0}$ : concentración inicial de CO<sub>2</sub> (mol/L).

$C_A$ : concentración de NaOH para diferentes tiempos (mol/L).

$C_B$ : concentración de CO<sub>2</sub> para diferentes tiempos (mol/L).

M: relación de alimentación.

k: constante específica de velocidad de reacción (L/mol s).

t: tiempo (s).

Al aplicar el método integral se obtuvieron los diferentes valores de k para los distintos tiempos. Este procedimiento se llevó a cabo tanto para la temperatura de 30 °C como para 50 °C. Se despejó k de la ecuación 3 y se determinaron varios valores de la misma.

Para determinar la energía de activación y el factor de colisión se utilizó la ecuación 4 (ecuación de Arrhenius). Se siguió la metodología propuesta por Levenspiel, (2004) y Matos, (1986).

$$k = k_0 * e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (4)$$

donde:

$k_0$ : factor de colisión (L/(mol s)).

$E_a$ : energía de activación (J/mol).

T: Temperatura (K).

R: constante universal de los gases (J/(molK)).

### 2.3 Procesamiento estadístico

Se realizaron pruebas de hipótesis no paramétricas (muestras independientes) con el objetivo de comprobar que las constantes específicas de velocidad solo dependen de la temperatura. Se consideraron cuatro grupos para cada valor de temperatura (30 y 50°C). La estructura de los grupos se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Estructura de los grupos para las pruebas de hipótesis a una misma temperatura

| <i>Grupo</i> | <i>Variables</i>                   |
|--------------|------------------------------------|
| 1            | Presión: 1 atm, agitación: 200 rpm |
| 2            | Presión: 3 atm, agitación: 200 rpm |
| 3            | Presión: 1 atm, agitación: 600 rpm |
| 4            | Presión: 3 atm, agitación: 600 rpm |

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización del agua residual

Se realizó la caracterización del agua residual y se muestran los resultados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Características de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma” utilizadas en los experimentos

| Parámetros  | Valor |
|---|-------|
| pH  | 9,0   |
| Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}^2$ ) | 1 235 |
| Temperatura ( °C)                                     | 35    |
| Sólidos sedimentables (mg/L)                          | 1     |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)                               | 250   |
| DQO de reflujo (mg/L)                                 | 424   |
| Nitrógeno total (mg/L)                                | 63    |
| Fósforo total   | 0,28  |
| SST(mg/L)   | 25    |
| SSV (mg/L)  | 7     |
| SSF(mg/L)   | 18    |
| n-Hexano (mg/L)                                       | 8     |

Se obtuvo un pH de 9, básico. Este valor está dado fundamentalmente por la presencia de NaOH en las aguas residuales, debido al uso de esta sustancia en los procesos de blanqueo y mercerizado que se llevan a cabo en la textilera. El mercerizado es el tratamiento de los hilos y tejidos de algodón y poliéster con una solución de sosa cáustica para que resulten brillantes y más resistentes. Además, el tintado del algodón se realiza con un pH de entre 9,5 y 11, este pH se consigue con Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y/o NaOH. Los valores de DQO de reflujo y DBO<sub>5</sub> fueron 424 y 250 (mg/L) respectivamente. Los mismos se asocian a la presencia de sustancias como los compuestos azoicos presentes en los colorantes y que no se fijan totalmente al tejido. Los resultados obtenidos relacionados con la generación de gran cantidad de efluentes contaminados por colorantes, auxiliares químicos y sólidos suspendidos en el teñido han sido reportados también por otros autores, Morillo, (2012) y (Hussain y col., 2018).

#### 3.2 Determinación de las constantes específicas de velocidad

En las Tablas 3 y 4 se muestran los valores de las constantes específicas de velocidad para la temperatura de 30°C y 50°C, respectivamente. Las mismas fueron determinadas considerando los valores de pH y mediante el empleo de la ecuación 3.

**Tabla 3.** Valores de las constantes específicas de velocidad para la temperatura de 30°C

| Grupo | P (atm) | agitación (rpm) | k (L/(mol s)) |
|-------|---------|-----------------|---------------|
| 1     | 1       | 200             | 45,150        |
|       | 1       | 200             | 36,285        |
|       | 1       | 200             | 52,687        |
|       | 1       | 200             | 44,355        |

|   |   |     |        |
|---|---|-----|--------|
| 2 | 3 | 200 | 55,023 |
|   | 3 | 200 | 66,228 |
|   | 3 | 200 | 59,725 |
|   | 3 | 200 | 49,273 |
| 3 | 1 | 600 | 70,956 |
|   | 1 | 600 | 82,257 |
|   | 1 | 600 | 70,163 |
|   | 1 | 600 | 58,470 |
| 4 | 3 | 600 | 50,544 |
|   | 3 | 600 | 73,588 |
|   | 3 | 600 | 61,218 |
|   | 3 | 600 | 51,833 |

**Tabla 4.** Valores de las constantes específicas de velocidad para la temperatura de 50°C

| <i>Grupo</i> | <i>P (atm)</i> | <i>agitación (rpm)</i> | <i>k (L/(mol s))</i> |
|--------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 1            | 1              | 200                    | 114,569              |
|              | 1              | 200                    | 134,586              |
|              | 1              | 200                    | 110,606              |
|              | 1              | 200                    | 90,285               |
| 2            | 3              | 200                    | 113,348              |
|              | 3              | 200                    | 114,745              |
|              | 3              | 200                    | 87,250               |
|              | 3              | 200                    | 68,894               |
| 3            | 1              | 600                    | 113,236              |
|              | 1              | 600                    | 145,915              |
|              | 1              | 600                    | 111,938              |
|              | 1              | 600                    | 90,618               |
| 4            | 3              | 600                    | 127,174              |
|              | 3              | 600                    | 115,205              |
|              | 3              | 600                    | 87,558               |
|              | 3              | 600                    | 69,125               |

La constante de velocidad  $k$  es el término dependiente de la temperatura dentro de la ley de velocidad, pero puede implicar una dependencia en otros factores asociados a la reacción como catalizadores, el solvente, fuerza iónica, entre otros, sin embargo muchas veces se puede despreciar la influencia de estos factores obteniendo buenos resultados para muchos datos experimentales al aplicar la ecuación de Arrhenius. En el estudio realizado no se emplearon catalizadores.

### 3.3 Validación estadística de las constantes específicas de velocidad

Al realizar las dos pruebas de hipótesis no paramétricas para los valores de las constantes de velocidad específica de la reacción ( $k$ ) hallados experimentalmente para la temperatura 30°C y 50°C se obtuvieron los valores de sigma de 0,171 y 0,76 respectivamente. La hipótesis nula considerada en cada caso es que no existía diferencia

significativa entre los valores de  $k$  a una misma temperatura y la hipótesis alternativa es que sí había diferencias entre los valores de  $k$ . Como los valores de  $\sigma$ , utilizando el test de Kruskal-Wallis, son superiores a 0,05, se acepta la hipótesis nula por lo que no existen diferencias significativas entre los cuatro grupos considerados para cada temperatura.

Se determinó el valor promedio de las constantes de velocidad específica para las temperaturas, de 30°C y 50°C, los cuales son 57,98 y 105,94 L/(mol s) respectivamente. Se realizó una prueba de hipótesis no paramétrica para los valores de las constantes de velocidad específica de la reacción ( $k$ ) obtenidos experimentalmente para las temperaturas de 50 y 30 °C. Se obtuvo un nivel de significación inferior a 0,05 (0,001) por lo que se rechaza la hipótesis nula que plantea que la distribución de las  $k$  es la misma entre las categorías de temperatura. Este resultado concuerda con lo expresado en la ecuación de Arrhenius, (Levenspiel, 2004), ya que un aumento de temperatura incrementa la energía de las partículas, la efectividad de los choques y como consecuencia la velocidad de la reacción. El factor de colisión obtenido tiene un valor de 978532,58 L/ (mol s)

Se calculó la energía de activación, cuyo valor es 24,5 kJ/mol, próximo al reportado por Himmelblau y Babb, (1958) (21,9 kJ/mol) para la reacción entre el dióxido de carbono y el hidroxilo (1) y en el orden del reflejado por otros autores, (Pohoreckl y Moniuk, 1988). Se corrobora que la reacción entre el CO<sub>2</sub> y las aguas residuales de la textilera puede ser considerada como una reacción irreversible de segundo orden, cuya expresión completa de la ley de velocidad se muestra en la ecuación 5.

$$-\frac{dc_{NaOH}}{dt} = 978532,58 * e^{-\frac{2949,3}{T}} * c_{NaOH} * c_{CO_2} \quad (5)$$

#### 4. CONCLUSIONES

- 1) El agua residual de la textilera “Desembarco del Granma” presenta un pH superior al neutro, por lo que antes del proceso biológico al que será sometida, se precisa de un ajuste del pH mediante la adición de CO<sub>2</sub>. Esto posibilitará un proceso tecnológico más compatible tanto desde el punto de vista técnico como ambiental.
- 2) Las constantes de velocidad específica para las temperaturas de 30°C y 50°C determinadas son 57,98 y 105,94 L/ (mol s) respectivamente para la reacción de neutralización del agua residual textil con CO<sub>2</sub>.
- 3) La reacción entre el agua residual de la textilera “Desembarco del Granma” y el CO<sub>2</sub> es de segundo orden y presenta un valor de energía de activación de 24,5 kJ/mol.

#### REFERENCIAS

- Baird, R., & Eaton, A., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., Edición No. 23, 2017, pp. 15-16.  
<https://www.abebooks.com/9780875532875/Standard-Methods-Examination-Water-Wastewater-087553287X/plp>

- Castillo, V., Diseño y cálculo de un agitador de fluidos., Seminario presentado para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica, Chile, 2013.
- Córdova, V., Rodríguez, D., Tito, D., Arias-Lafargue, T., & Horruitiner, T., Composición de los licores residuales del Combinado Textil Celia Sánchez Manduley., Tecnología Química, Vol. 40, No. 3, 2020, pp. 502-516. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000300502&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852020000300502&script=sci_abstract&tlng=es)
- Duque, J., El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad., Ingeniería hidráulica y ambiental, Vol. XXXIX, No. 2, Mayo-Agosto 2018, pp. 46-59. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n2/riha04218.pdf>
- Haubrock, J., Hogendoorn, A., & Geert, F., The applicability of activities in Kinetic Expressions: a more fundamental approach to represent the Kinetics of the System CO<sub>2</sub>-OH<sup>-</sup> in salt terms of activities., International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol. 62, No. 21, 2007, pp. 5763-5769. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.06.018>
- Herrera, J., Estudio cinético de la reacción de carboxilación en  $\alpha$ -tetralonas sustituidas., Trabajo de titulación, modalidad Proyecto de Investigación para la obtención del Título de Ingeniero Químico, Quito, 2020. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20824>
- Himmelblau, D., & Babb, A., Kinetic studies of carbonation reactions using radioactive tracers., AIChE, Vol. 4, No. 2, 1958, pp. 143-152. <https://doi.org/10.1002/aic.690040206>
- Hua, Y., Peiwen, Q., Yuange, Q., Zhuwen, K., Xiaolong, Z., Zhihua, T., & Huafang, G., Textile Wastewater Treatment for Water Reuse: A Case Study., Processes, Vol. 7, No. 1, 2019, pp. 33-34. <https://doi.org/10.3390/pr7010034>
- Hussain, S., Govindarajan, B., Kandhaswamy, R., & Maruthamuthu, N., Innovative Approach for Reuse of Concentrate Brine in Textile Dyeing Zero Liquid Discharge Plants the Arulpuram CETP, Tirupur Case Study., Colloquium on Textile Wastewater Management, India, 2018, pp. 71-96. [https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/10847/1/Conference\\_Manual\\_Integrated%20Best%20Available%20Wastewater%20Management%20in%20the%20Textile%20Industry.pdf](https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/10847/1/Conference_Manual_Integrated%20Best%20Available%20Wastewater%20Management%20in%20the%20Textile%20Industry.pdf)
- Levenspiel, O., Ingeniería de las reacciones químicas., Capítulo 3, Tercera edición, Limusa Wiley, México, 2004, pp. 44-45.
- Matos, R., Aspectos fundamentales de la Química Física., Capítulo 2, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1986, pp. 181-216.
- Morillo, S., Propuesta de producción más limpia (P+L) en el proceso de tinturado, en la industria "Textiles María Belén" ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito., tesis presentada en opción al Título de Ingeniera Ambiental Grado Académico de Tercer Nivel de formación, Universidad Central del Ecuador, 2012. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/662>
- NC.27, 2012., Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado, Especificaciones., Cuba, Oficina Nacional de Normalización, 2012, pp. 6-7.
- Perry, C., Manual del ingeniero químico., sección 3, 6ta edición, Mc Graw-Hill, New York, 1992, pp. 284-285.
- Pohoreckl, R., & Moniuk, W., Kinetics of reaction between carbon dioxide and

- hydroxyl ions in aqueous electrolyte solutions., *Chemical Engineering Science*, Vol. 43, No. 1, 1988, pp. 1677-1684.
- Romero, T., Rodríguez, H., & Masó, A., Caracterización de las aguas residuales generadas en una industria textil cubana., *Riha*, Vol. 37, No. 3, septiembre-diciembre, 2016, pp. 46-50.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382016000300004](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382016000300004)
- Speight, J., *Chemical and Process Design, Handbook*: McGraw-Hill: New York, 2002, pp. 147-149.
- Villarreal, A., y Cuevas-García, R., Obtención y análisis de expresiones de cinética química., *Mundo Nano*, Vol. 14, No. 26, enero-junio 2021, pp. 1-26.  
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2021.26.69638>
- Yaseen, D., & Scholz, M., Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review., *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 16, 2019, pp. 1193–1226.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-018-2130-z>

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- M.Sc. Mercedes Arbona Cabrera. Realizó la determinación experimental de los datos cinéticos, procesó los resultados y participó en la escritura del artículo.
- Dra.C. Isabel Cabrera Estrada. Colaboró en las mediciones experimentales, en el análisis de los resultados y la escritura del artículo.
- Dr.C. José Antonio Fabelo Falcón. Colaboró en el análisis de los resultados.
- Dra. C. María Eugenia O' Farrill Pie. Participó en el procesamiento estadístico.
- M.Sc. María de los Ángeles García Hernández. Colaboró con las mediciones experimentales.