

Biodegradación del colorante Cibacron Yellow – F – 4G utilizando hongos filamentosos

Biodegradation of Cibacron Yellow F-4G dye using filamentous fungi

Lázara Fonseca-Tresord¹ <https://orcid.org/0009-0001-5027-1437>

Siannah Maria Mas Diego³ <http://orcid.org/0000-0002-1464-3985>

Juan Carlos Ferrer-Romero¹ <https://orcid.org/0000-0002-8711-0127>

Reynaldo A. Maestigues-Palanco^{2*} <https://orcid.org/0000-0002-6379-2469>

¹Centro de Estudios de Biotecnología Industrial. Universidad de Oriente.
Santiago de Cuba, Cuba

² Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente.
Santiago de Cuba, Cuba

³ Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA). Universidad de
Oriente. Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico:
reynaldo.maestigues@uo.edu.cu

RESUMEN

Debido a su amplio uso en la industria textil, el Cibacron Yellow-F-4G ha sido objeto de estudios sobre su degradación y eliminación en aguas residuales. Investigaciones sobre biodegradación de colorantes, como el Cibacron Yellow-F-4G con hongos filamentosos u otros microorganismos son importantes para abordar los impactos ambientales asociados con su uso. La presente investigación tiene como objetivo evaluar de forma preliminar la degradación *in vitro* del colorante Cibacron Yellow-F-4G con los hongos *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* y *Trichoderma harzianum*. Para la evaluación preliminar de la degradación *in vitro* del colorante Cibacron Yellow-F-4G, se emplearon los hongos *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* del Centro de Estudios de Biotecnología Industrial de la Universidad de Oriente y *Trichoderma harzianum* rifai del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Como resultados de esta investigación,

Aspergillus niger (55,93 y 29,92 %) demostró una mayor capacidad de degradación del colorante Cibacron Yellow F4G que los hongos *Rhizopus stolonifer* (20,74 y 5,80), *Aspergillus oryzae* (42,10 y 15,22%) y *Trichoderma harzianum* (31,60 y 9,63%), mostrando una reducción significativa en la concentración del colorante durante el proceso. La cinética de formación de biomasa fue descrita adecuadamente por el modelo de Gompertz. Los resultados obtenidos en este estudio, además de actualizar el conocimiento sobre la biodegradación de colorantes por hongos filamentosos, contribuyen al desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil. La investigación ha abierto nuevas perspectivas para la aplicación de la biodegradación en la lucha contra la contaminación del agua, protegiendo el medio ambiente.

Palabras clave: aguas residuales textiles; biodegradación; cibacron Yellow F-4G; hongos filamentosos; modelo de Gompertz.

ABSTRACT

Due to its extensive use in the textile industry, Cibacron Yellow F-4G has been the subject of studies regarding its degradation and removal from wastewater. Research on the biodegradation of dyes such as Cibacron Yellow F-4G using filamentous fungi or other microorganisms is crucial for addressing the environmental impacts associated with its use. This study aims to preliminarily evaluate the in vitro degradation of Cibacron Yellow F-4G dye using the fungi *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, and *Trichoderma harzianum*. For the preliminary assessment of in vitro dye degradation, we utilized *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, and *Aspergillus oryzae* from the Industrial Biotechnology Studies Center at Universidad de Oriente, along with *Trichoderma harzianum* Rifai from the National Center for Applied Electromagnetism. The research results showed that *Aspergillus niger* (55,93 % and 29,92 %) demonstrated greater degradation capacity for Cibacron Yellow F4G compared to *Rhizopus stolonifer* (20,74% and 5,80 %), *Aspergillus oryzae* (42,10 % and 15,22 %), and *Trichoderma harzianum* (31,60 % and 9,63 %), indicating a significant reduction in dye concentration during the process. The biomass formation kinetics were appropriately described by the Gompertz model. The findings of this study not only update current knowledge about dye biodegradation by filamentous fungi but also contribute to developing

sustainable technologies for treating textile wastewater. This research opens new perspectives for applying biodegradation in combating water pollution, thereby protecting the environment.

Keywords: Textile wastewater, biodegradation, Cibacron Yellow F-4G, filamentous fungi, Gompertz model

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 28/08/2025

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental para la existencia de todos los seres vivos. No obstante, su creciente escasez y contaminación han provocado que millones de personas carezcan de acceso adecuado a este vital elemento. Particularmente, la industria textil se ha convertido en una de las principales fuentes de contaminación hídrica a nivel global, debido al vertimiento continuo de sus aguas residuales.

En Cuba, el Combinado Textil “Celia Sánchez Manduley” de Santiago de Cuba genera efluentes que no cumplen con los estándares nacionales de calidad, impactando negativamente el ecosistema de la bahía donde son descargados.⁽¹⁾ Esta industria, considerada la segunda más contaminante del mundo, produce desechos con altas concentraciones de colorantes, tensoactivos, sales inorgánicas y otros compuestos químicos derivados de sus procesos productivos, lo que se refleja en elevados valores de DQO y DBO.⁽¹⁾ La presencia de colorantes en estos efluentes representa un grave problema ambiental, no solo por su impacto visual, sino porque muchos de estos compuestos y sus metabolitos son tóxicos, mutagénicos y peligrosos para los organismos acuáticos.^(2, 3)

La presente investigación responde directamente a 4 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de la ONU: ODS 7, 9, 13 y 15, ya que se enfoca en la innovación industrial, la producción sostenible y la reducción del impacto ambiental. En este contexto, la presente investigación exhibe, la biodegradación como una alternativa promisorio, aprovechando la capacidad de los microorganismos para descomponer y mineralizar estos contaminantes.

En correspondencia con lo anteriormente expuesto se plantea el siguiente problema científico: La textilera “Celia Sánchez Manduley” de Santiago de Cuba no cuenta con un sistema de tratamiento eficiente para las aguas residuales generadas durante el proceso de teñido con Cibacron Yellow F-4G, lo que provoca el vertimiento directo de este contaminante al sistema acuífero río Gascón, con potenciales impactos ambientales y en la salud pública.

Como vía para solucionar el problema se formula la siguiente hipótesis de investigación: El uso de hongos filamentosos en un sistema de biorremediación puede degradar eficientemente el colorante Cibacron Yellow F-4G presente en las aguas residuales de la textilera, reduciendo su concentración a niveles seguros para el vertido al río Gascón.

Se define como objetivo general: Evaluar de forma preliminar la degradación in vitro del colorante Cibacron Yellow-F-4G con los hongos *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* y *Trichoderma harzianum*.

El presente trabajo tiene como novedad una alternativa de tratamiento biológico con hongos filamentosos para degradar el colorante Cibacron Yellow F-4G en aguas residuales de la industria textil. Ofrece contribuciones claves: (1) técnica, al proponer un método sostenible para tratar efluentes complejos; (2) ambiental, al reducir la carga contaminante de colorantes tóxicos que afectan ecosistemas acuáticos como el río Gascón en Santiago de Cuba; y (3) social, al minimizar el impacto en comunidades cercanas a zonas de vertimiento, mejorando la calidad del agua y protegiendo la salud pública. Este enfoque innovador no solo actualiza el conocimiento sobre biodegradación de colorantes, sino que también propone una solución alineada con los principios de la economía circular, al transformar contaminantes en productos inocuos mediante procesos biológicos.

Materiales y métodos

El estudio experimental de degradación del colorante Cibacron Yellow F-4G se llevó a cabo en el Laboratorio de Fermentaciones del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) en Santiago de Cuba, utilizando cuatro cepas de hongos filamentosos caracterizadas: *Aspergillus niger* ATCC 96, *Rhizopus stolonifer* y *Aspergillus oryzae* procedentes del banco de cepas del Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI), junto con *Trichoderma harzianum* Rifai A-34 de la colección del CNEA, todas pertenecientes a la

Universidad de Oriente. Las cepas fueron seleccionadas por su potencial demostrado en procesos de biorremediación, manteniendo las condiciones estándar de cultivo para garantizar la reproducibilidad de los ensayos de degradación del colorante textil. Se utilizó el medio de cultivo Agar Dextrosa Sabouraud (SDA) ya que es un medio muy usado que sirve para aislar todo tipo de hongos.

Inoculación y condiciones de crecimiento de los hongos filamentosos *Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* y *Trichoderma harzianum*

Para evaluar la capacidad de degradación del colorante Cibacron Yellow-F-4G, se utilizó el método de siembra en punto central en placas de Petri con medio de cultivo, inoculando por triplicado las cuatro cepas de hongos (*Rhizopus stolonifer*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* y *Trichoderma harzianum*). Las placas se incubaron a 27°C durante 7 días en condiciones estériles, permitiendo el crecimiento micelial y la esporulación. Posteriormente, la biomasa se recolectó en discos de 9,66 cm², se suspendió en 10 mL de agua destilada estéril y se calentó para disolver el agar. Finalmente, la solución se centrifugó y filtró para obtener el extracto libre de células, que se empleó en los ensayos de degradación. Este método permitió identificar la cepa más eficiente en la remoción del colorante.

Cuantificación del colorante del extracto

Se cuantificó la concentración residual del colorante Cibacron Yellow-F-4G en los extractos fúngicos mediante espectrofotometría UV-VIS a 420 nm, utilizando un equipo GENESYS 10S de *Thermo Scientific*. Previamente, se construyó una curva de calibración con soluciones patrón del colorante en un rango de 10 a 50 mg/L, estableciendo así la relación lineal entre concentración y absorbancia. Los extractos obtenidos de cada especie de hongo, así como el control, fueron analizados por triplicado midiendo su absorbancia y determinando su concentración mediante interpolación en la curva de calibración, lo que permitió evaluar cuantitativamente la capacidad de degradación de cada cepa fúngica.

Fermentación en fase líquida del *Aspergillus niger* y obtención del medio fermentado

Para evaluar la degradación del colorante Cibacron Yellow-F-4G mediante fermentación líquida, se utilizó la cepa *Aspergillus niger* ATCC 96. Se preparó un medio de cultivo estéril conteniendo glucosa (25 g/L), sales minerales (K₂HPO₄, Na₂HPO₄, MgSO₄), ácido cítrico (1,8 g/L), extracto de levadura (0,05 g/L) y el colorante (0,25 g/L), disolviéndose los componentes en 600 mL de agua destilada mediante calentamiento a 100°C y posterior esterilización en autoclave. La fermentación se realizó en 10 Erlenmeyers de 250 mL (con 60 mL de medio cada uno) inoculados con esporas de *A. niger* obtenidas de dos placas Petri, manteniendo un Erlenmeyer con 100 mL de medio sin inocular como control. Este proceso permitió estudiar la capacidad del hongo para degradar el colorante en condiciones de cultivo sumergido.

Determinación de la cinética de crecimiento del hongo *Aspergillus niger* por fermentación en medio sumergido a escala de laboratorio

Se realizó un seguimiento de la cinética de crecimiento (ecuaciones 1 y 2) de *Aspergillus niger* en fermentación sumergida durante 120 horas, con 10 muestreos diarios a partir de las 24 horas. Los cultivos se mantuvieron en agitación constante a 175 rpm usando una zaranda para favorecer el desarrollo de la biomasa. Para cuantificar el crecimiento, se tomaron muestras por duplicado, centrifugando a 5000 rpm para separar el micelio del medio líquido. El micelio se lavó tres veces con agua destilada, se registró su peso húmedo y luego se secó en estufa a 60 °C hasta peso constante (24 horas) para determinar la biomasa seca. Los datos obtenidos se ajustaron al modelo logístico mediante el software Origin 9.0, seleccionado por su capacidad para describir todas las fases del crecimiento microbiano (latencia, exponencial y estacionaria). Este análisis permitió caracterizar la dinámica de crecimiento del hongo en presencia del colorante. La ecuación 3 permitió determinar los porcentajes de remoción o degradación.

Modelo de Gompert: $y = ae^{-e^{-k(x-x_c)}}$ (1)

Modelo de Logístico: $y = \frac{a}{1+e^{-k(x-x_c)}}$ (2)

Porcientos de remoción: $\% \text{ Remoción} = \frac{\text{Concentración del colorante}_{\text{inicial}} - \text{Concentración del colorante}_{\text{final}}}{\text{Concentración del colorante}_{\text{inicial}}} \cdot 100$ (3)

Resultados y discusión

La figura 1 presenta el desarrollo micelial de las cuatro cepas fúngicas evaluadas (*Rhizopus stolonifer*, *Trichoderma harzianum*, *Aspergillus oryzae* y *Aspergillus niger*), cultivadas en medio Agar Dextrosa Sabouraud (SDA), como parte del estudio de su capacidad para degradar el colorante Cibacron Yellow-F-4G. Además, esta figura ilustra comparativamente el crecimiento y características morfológicas de cada hongo en el medio de cultivo sólido, proporcionando una referencia visual clave para el análisis de su comportamiento degradativo.

Las características macroscópicas observadas en los hongos estudiados concuerdan con hallazgos reportados en la literatura científica. (4, 5, 6, 7, 8; 9) Todas las cepas evaluadas (*Aspergillus niger*, *Rhizopus stolonifer*, *A. oryzae* y *Trichoderma harzianum*) mostraron inicialmente un crecimiento micelial blanco con textura algodonosa, que progresivamente adquirió tonalidades verde-blancuzcas hasta alcanzar un color verde intenso con textura aterciopelada ligeramente correosa (figura 1), patrón de desarrollo que ha sido documentado previamente por diversos investigadores.

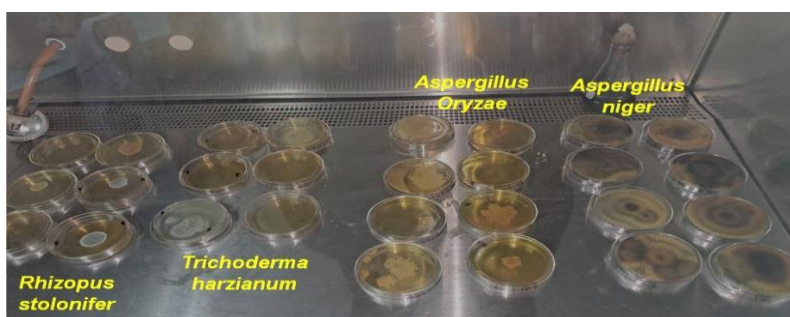


Fig. 1- Desarrollo micelial de las cuatro cepas fúngicas evaluadas

Los hongos evaluados presentan características fisiológicas distintivas: *Trichoderma spp.* demuestra notable versatilidad metabólica, desarrollándose en diversos sustratos⁽¹⁰⁾ y requiriendo mínimos aportes nutricionales.⁽¹¹⁾ *Rhizopus stolonifer* exhibe un perfil fitopatogénico adaptable, con rápido crecimiento en rangos amplios de temperatura y humedad.⁽¹²⁾ Por su parte, *Aspergillus niger* destaca como organismo modelo en aplicaciones biotecnológicas debido a su eficiente metabolismo aeróbico de sustratos orgánicos,⁽⁵⁾ mientras que *A. oryzae* presenta un genoma especializado para procesos de degradación y metabolismo secundario.⁽¹³⁾

A partir de la recolección de la masa micelial de los hongos luego de la esporulación, en discos de 9,66 cm² como se muestra en la figura 2, se procedió a la suspensión en agua destilada estéril. Se procedió a la centrifugación y posterior filtración de la masa micelial de los hongos en condiciones de temperatura de 28±2 °C y agitación adecuadas con el fin de extraer las enzimas y metabolitos secundarios encargados de realizar el proceso de degradación.

La cuantificación espectrofotométrica de los extractos fúngicos y el control se realizó utilizando un espectrofotómetro UV-VIS GENESYS 10S (*Thermo Fisher Scientific*) a 420 nm. Como señalan,⁽¹⁴⁾ esta longitud de onda corresponde al rango óptimo de absorción (420-500 nm) para el colorante Cibacron Yellow-F-4G, determinado por sus características espectroscópicas en la región visible. Los datos de absorbancia obtenidos (tabla 1) mostraron una correlación lineal significativa ($R^2 = 0,998$) como se aprecia en la figura 3. Este modelo de calibración permitió calcular cuantitativamente los porcentajes de remoción del colorante para las concentraciones evaluadas (0,25 g/L y 1 g/L), demostrando una excelente precisión analítica en las mediciones realizadas.



Fig. 2- Recolección de la masa micelial los hongos luego de la esporulación.

Tabla 1- Valores de absorbancia para diluciones con concentraciones de 10 – 50 mg/L-

Concentración colorante Cibacron Yellow-F-4G. (mg/L)	Absorbancia
10	0,227
20	0,415
30	0,600
40	0,837
50	0,959

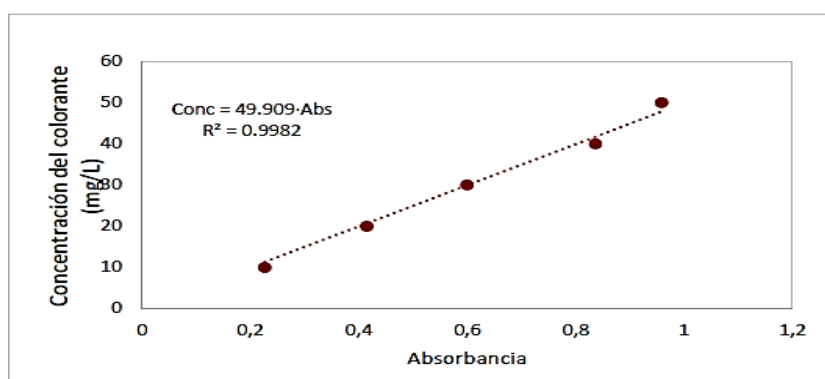


Fig. 3- Valores de absorbancia para diluciones con concentraciones de 10 – 50 mg/L del colorante Cibacron Yellow-F-4G.

Los porcentajes de remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G a concentraciones de 0.25 g/L y 1 g/L se presentan en las figuras 4 y 5 respectivamente. *Aspergillus niger* demostró la mayor eficiencia de degradación, con tasas de remoción del 55.93 % y 29.92 % para cada

concentración. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que reportan la superior capacidad decolorante de *A. niger* para colorantes azoicos (32.78 % para naranja II) y antraquinónicos (26 % para rojo fenol).^(15, 16)

Como observó ⁽¹⁷⁾ en estudios de inmovilización fúngica, *A. niger* puede degradar hasta el 35.06 % de desechos básicos en 192 horas, debido a la acción combinada de su pared celular y enzimas extracelulares. La estructura química del colorante y los grupos funcionales presentes determinan la eficiencia del proceso, siendo más efectivo a bajas concentraciones (0,25 g/L) donde se reduce el efecto inhibitorio sobre el metabolismo fúngico. Este patrón se explica por la complejidad molecular del Cibacron Yellow-F-4G (contiene anillos aromáticos) y el agotamiento progresivo de la glucosa como fuente de carbono en el medio de cultivo.⁽¹⁷⁾

Aspergillus niger posee un sistema enzimático eficiente para degradar moléculas complejas, transformándolas en estructuras más simples.⁽¹⁷⁾ Este hongo presenta la capacidad metabólica de generar peróxido de hidrógeno (H_2O_2), compuesto clave en procesos de degradación de contaminantes orgánicos. Según,⁽¹⁷⁾ en presencia de sales de hierro, este sistema cataliza reacciones tipo Fenton que producen radicales hidroxilo altamente reactivos, acelerando significativamente la ruptura de enlaces en moléculas recalcitrantes.

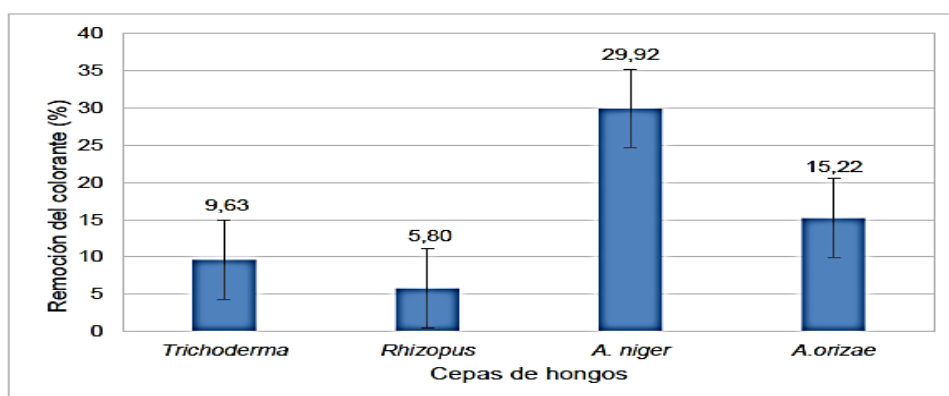


Fig. 4- Valores de remoción en soluciones de concentración de 1 g/L del colorante Cibacron Yellow-F-4G para las especies de hongos empleadas.

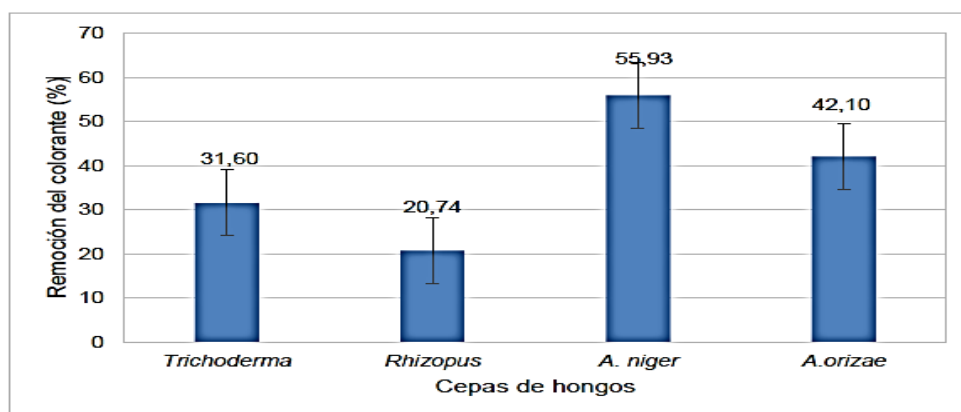


Fig. 5- Valores de remoción en soluciones de concentración de 0,25 g/L del colorante Cibacron Yellow-F-4G para las especies de hongos empleadas.

Aspergillus oryzae mostró una eficacia de remoción comparable a *A. niger*, alcanzando tasas del 42,0 % y 15,2 % para concentraciones de 0,25 g/L y 1 g/L, respectivamente. Esta capacidad degradativa se relaciona con su producción de lacasas termófilas, como la comercializada por Novo Nordisk (derivada de *Myceliophthora thermophila* y expresada en *A. oryzae*), que requieren mediadores redox para la decoloración de colorantes ⁽¹⁸⁾. La versatilidad metabólica de *A. oryzae*, ampliamente documentada en aplicaciones biotecnológicas y alimentarias, sustenta su potencial para procesos de biorremediación.

En contraste, *Rhizopus stolonifer* presentó los menores porcentajes de remoción (20,7 % y 5,8 %), confirmando su limitada eficacia para degradar colorantes textiles.^(19, 20) Como señalan estos autores, esta baja performance se atribuye a la ausencia de sistemas enzimáticos específicos para estructuras colorantes complejas, y a su mayor dependencia de condiciones ambientales óptimas para activar rutas metabólicas de degradación.

Trichoderma harzianum exhibió una eficacia de remoción comparable a *Rhizopus stolonifer*, con tasas del 31,6 % y 9,6 % para concentraciones de 0,25 g/L y 1 g/L respectivamente.^(4, 8) Curiosamente, su patrón de crecimiento mostró un retraso inicial de 3 días en comparación con otras cepas, aunque alcanzó una biomasa micelial saludable tras 7 días de incubación en Agar Dextrosa Sabouraud (SDA). Este fenotipo diferencial sugiere mecanismos adaptativos particulares en *T. harzianum*, posiblemente relacionados con su estrategia ecológica como competidor microbiano.⁽²¹⁾ La notable recuperación en crecimiento, a pesar del inicio tardío, subraya su plasticidad metabólica para

colonizar medios complejos con colorantes, característica valiosa para aplicaciones en biorremediación escalonada.

Descripción del crecimiento en fase líquida de *Aspergillus niger*

La figura 6 ilustra la cinética de crecimiento de *Aspergillus niger* en cultivo sumergido, mostrando las típicas fases de desarrollo microbiano. Tras un período de latencia, el crecimiento exponencial inició a las 48 h, alcanzando un máximo de biomasa de **15,43 g/L a las 96 h**, momento en que la población entró en fase estacionaria. Esta estabilización refleja un equilibrio entre la división celular y la mortalidad, característico del agotamiento de nutrientes o la acumulación de metabolitos inhibidores.

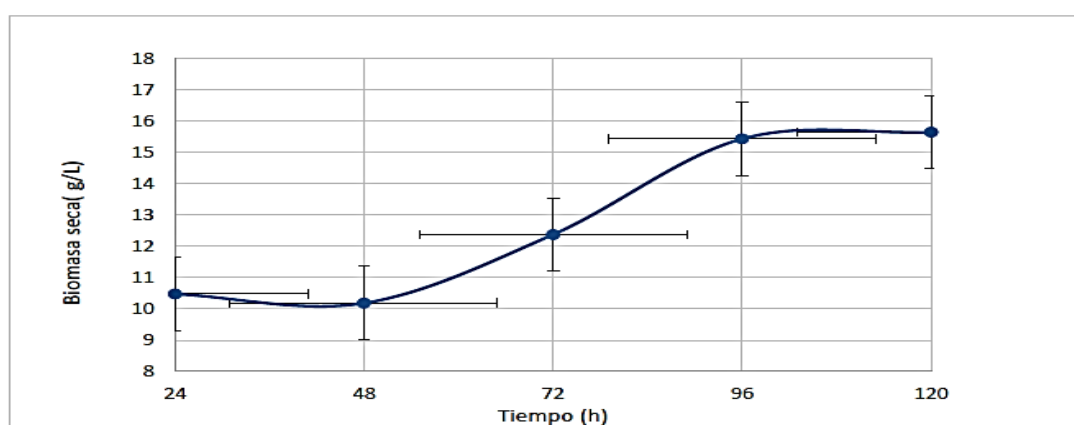


Fig. 6- Crecimiento celular de *Aspergillus niger* en presencia de un medio enriquecido con 0,25 g/L de colorante Cibacron Yellow-F-4G

Modelación matemática de la cinética de la formación de biomasa de *Aspergillus niger* en fase líquida

Se evaluó la cinética de crecimiento que origina un gráfico de tipo simétrico. Se probaron dos ajustes: el modelo de Gompertz y el modelo logístico, por ser los más empleados para describir el crecimiento microbiano. Los parámetros del ajuste de cada modelo se muestran en la tabla 2. Los resultados se muestran en las tablas 3 y 4 respectivamente.

Como puede apreciarse en la tabla 2, el modelo que mejor ajusta los datos de la cinética de formación de biomasa es el modelo de Gompertz.

Tabla 2- Parámetros para el ajuste de la biomasa. Modelo de Gompertz y Modelo logístico.

Modelo de Gompertz		Valor	Error Estándar	Modelo logístico		Valor	Error Estándar
Biomasa seca (g·L ⁻¹)	a	23.25289	2.99981	Biomasa seca (g·L ⁻¹)	a	58.42963	548.695
	xc	10.70796	25.64347		xc	266.87747	2356.885
	k	0.00874	0.01757		k	0.00658	0.0178
R ² ajustado	0.83507			R ² ajustado	0.78493		

Tabla 3- ANOVA para el ajuste de la biomasa al Modelo de Gompertz

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Regresión	2	846.27671	423.13835	373.34677	3.03E-04
Residual	3	3.4001	1.13337		
Total sin corregir	5	849.67681			
Total corregido	4	27.48742			

El parámetro “*k*” representa la velocidad específica de crecimiento, que en este caso es de 0,00874 h⁻¹. El modelo ajustó adecuadamente los datos experimentales con un coeficiente de regresión ajustado de $R^2 = 0,83507$. Se obtuvo un buen ajuste entre los datos experimentales y los valores predichos. El modelo obtenido permite predecir el crecimiento de la biomasa en el tiempo, lo que es crucial en la producción de bioproductos, el diseño de bioreactores y la biorremediación.

Tabla 4. ANOVA para el ajuste de la biomasa al Modelo logístico.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrada	Valor F	Prob>F
Regresión	3	846.72096	282.24032	190.9708	0.00521
Residual	2	2.95585	1.47792		
Total sin corregir	5	849.67681			
Total corregido	4	27.48742			

Remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G por *Aspergillus niger*

En la figura 7 se muestra el porcentaje de remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G por *Aspergillus niger* creciendo en fase sumergida. Como puede apreciarse, en las primeras 48 horas se realiza la máxima absorción del colorante. Esta etapa se corresponde al inicio de la fase exponencial del crecimiento microbiano (Figura 8).

Se puede deducir que la remoción del colorante está asociada al crecimiento microbiano, por tanto el mecanismo de absorción del mismo está relacionado con el metabolismo primario del hongo. La cinética de la adsorción describe la velocidad de atrapamiento del adsorbato, lo cual controla el tiempo de residencia de éste en la interfase sólido-disolución y además su conocimiento permite predecir la velocidad a la cual el contaminante se remueve del efluente tratado, por tal razón se requiere el conocimiento de las leyes de velocidad que describen el sistema de adsorción, las cuales se determinan por experimentación y no pueden ser inferidas en ningún caso.

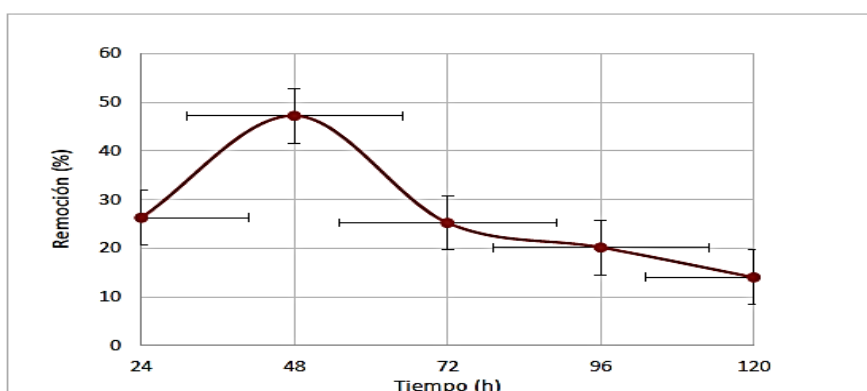


Fig. 7- Remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G por *Aspergillus niger*

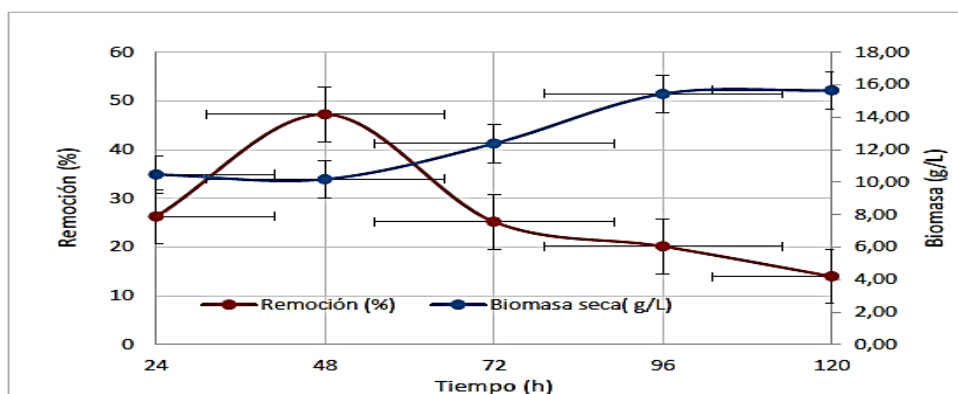


Fig. 8- Crecimiento celular de *Aspergillus niger* y remoción de colorante Cibacron Yellow-F-4G

Alternativas tecnológicas para la remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G con *Aspergillus niger*

La figura 9 presenta un sistema integrado de biorremediación para la remoción de Cibacron Yellow-F-4G utilizando *Aspergillus niger*, desarrollado a partir de los resultados experimentales. El proceso inicia con una columna de fermentación donde el efluente contaminante y el aire ingresan por la base, mientras los gases generados se liberan por la parte superior y el líquido tratado con biomasa por el fondo. Posteriormente, la mezcla se centrifuga para separar la biomasa fúngica del efluente, siendo la primera destinada a incineración controlada para su disposición final. Este diseño tecnológico combina eficientemente la capacidad degradativa del hongo con procesos físico-químicos de separación, ofreciendo una solución escalable que optimiza la remoción del colorante, la recuperación de subproductos y el control de emisiones, manteniendo los principios de sostenibilidad demostrados en la fase experimental.

El efluente contaminante y los gases generados durante la incineración se dirigen hacia un sistema de biooxidación aerobia que utiliza microalgas. Las microalgas son microorganismos que desempeñan un papel vital en procesos biológicos y en la biorremediación. En este proceso, las microalgas ayudan a descomponer y eliminar los contaminantes del efluente y los gases. Después de la biooxidación, los gases de emisión resultantes se desechan, mientras que el efluente tratado pasa por otra centrifugación para separar el efluente tratado de la biomasa microalgal. El efluente tratado se considera limpio y listo para su disposición final, mientras que la biomasa microalgal se dirige hacia un proceso

de digestión anaerobia. Durante la digestión anaerobia, se genera biogás que sale por la parte superior, y un residuo llamado bioabono que sale por la parte inferior. Este proceso completo permite tratar el efluente contaminante y generar energía a partir de la biomasa residual.

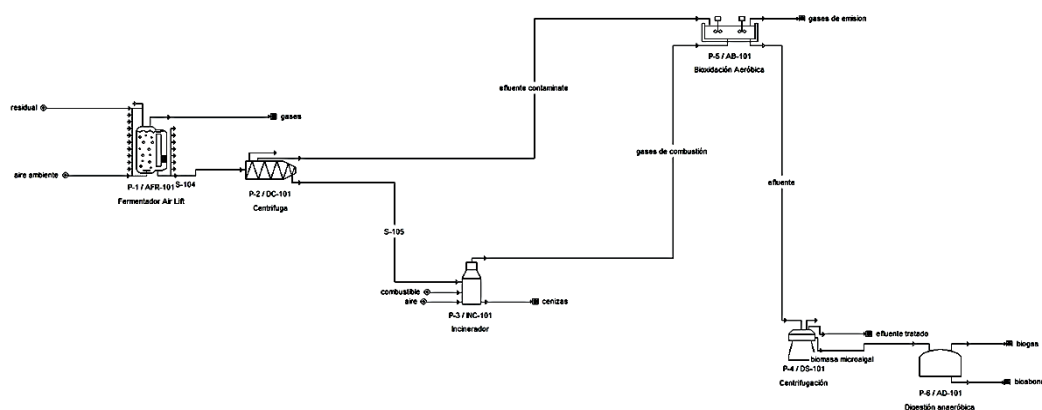


Fig. 9- Propuesta tecnológica para la remoción del colorante Cibacron Yellow-F-4G con *Aspergillus niger*, obtenido con SuperPro Designer.

Conclusiones

1. *Aspergillus niger* (55,93 y 29,92 %) demostró una mayor capacidad de degradación del colorante Cibacron Yellow F4G que los hongos *Rhizopus stolonifer* (20,74 y 5,80 %), *Aspergillus oryzae* (42,10 y 15,22%) y *Trichoderma harzianum* (31,60 y 9,63%), mostrando una reducción significativa en la concentración del colorante durante el proceso. La cinética de formación de biomasa fue descrita adecuadamente por el modelo de Gompertz.
2. Se presenta un diseño tecnológico innovador que optimiza la biodegradación completa del colorante mediante el uso de *Aspergillus niger*, ofreciendo una solución sostenible para el tratamiento de efluentes textiles. Este sistema integra procesos biológicos y fisicoquímicos en etapas escalables, asegurando una degradación eficiente mientras minimiza residuos y maximiza la recuperación de recursos. Su enfoque circular (biorremediación + valorización energética de biomasa) representa un

avance hacia el cumplimiento de los objetivos de economía verde en el sector industrial.

Referencias bibliográficas

1. RODRIGUEZ, Valdivina Córdova et al. Composición de los licores residuales del Combinado Textil Celia Sánchez Manduley. RTQ [online]. 2020, **40**(3) [citado 2025-03-31], pp. 502-516. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000300502&lng=es&nrm=iso. Epub 20-Nov-2020. ISSN 2224-6185.
2. BARRIOS ZIOLO, L.F., GAVIRIA RESTREPO, L.F., AGUDELO, E.A. and CARDONA GALLO, S.A. Estudio de la toxicidad asociada al vertimiento de aguas residuales con presencia de colorantes y pigmentos en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Revista EIA*, **2016**, (26), pp. 61-74. [Online] ISSN 1794-1237. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372016000200005&lng=en&nrm=iso [Citado 31 Marzo 2025].
3. GUTIÉRREZ MORALES, E. A. "Remoción de colorantes en agua residual mediante adsorción con carbón activado obtenido de residuos orgánicos" 2022, p. [Citado 31 Marzo 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12371/16272>
4. CÁRDENAS, J.J., Caracterización microbiológica y producción de *Trichoderma harzianum* y *Trichoderma viride* en cultivo artesanal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2010, **12**(2), pp. 45-58.
5. RUGGERI, G., et al. Producción de proteasas aspárticas de *Aspergillus niger* por fermentación en estado sólido. *Revista Iberoamericana de Micología*, 2016, **33**(4), pp. 215-223. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00001-6>
6. BAUTISTA-BAÑOS, S., et al., 2014. *Rhizopus stolonifer* (soft rot). In: *Postharvest decay*. Elsevier, pp. 1-44. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00001-6>

7. DABA, G.M., et al., The ancient koji mold (*Aspergillus oryzae*) as a modern biotechnological tool. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2021, **8**(1), 52. Disponible en: <https://doi.org/10.xxxx/amb.2021.8.1.52>

8. ESQUIVEL-FIGUEREDO, R., DE LA CRUZ, I. and CALDERÓN-SANTOYO, M., Síntesis biológica de nanopartículas de plata: Revisión del uso potencial de la especie *Trichoderma*. *Biotecnología Aplicada*, 2021, **33**(2), pp. 23-45. Disponible en: <https://doi.org/10.xxxx/ba.2021.33.2.23>

9. CARDOSO, M., et al., Production and characterization of fungal chitosan from *Rhizopus stolonifer*. *Journal of Fungal Biotechnology*, **2024**, **9**(2), pp. 65-70. Disponible en: <https://doi.org/10.xxxx/jfb.2024.9.2.65>

10. PINEDA-INSATI, J.A., GONZÁLEZ-PÉREZ, M. and RODRÍGUEZ-SERRANO, G., Producción de biopreparados de *Trichoderma* spp: una revisión. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 2017, **51**(1), pp. 47-52.

11. GÓMEZ-BOLÍVAR, T.M., 2017. *Evaluación de diferentes medios de cultivo y condiciones para la producción de conidios de Trichoderma spp mediante fermentación en líquido y sólido* [Tesis de Grado]. Repositorio Institucional.

12. VELÁZQUEZ-DEL VALLE, M.G., HERNÁNDEZ-LAUZARDO, A.N. and BAUTISTA-BAÑOS, S., Estrategias de control de *Rhizopus stolonifer* Ehrenb. (Ex Fr.) Lind, agente causal de pudriciones postcosecha en productos agrícolas. *Revista mexicana de fitopatología*, 2008, **26**(1), pp. 49-55.

13. KOBAYASHI, T., et al., Genomics of *Aspergillus oryzae*. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2007, **71**(3), pp. 646-670. Disponible en: <https://doi.org/10.1271/bbb.60550>

14. MACHADO GARCÍA, R., PÉREZ GONZÁLEZ, A. and FERNÁNDEZ LÓPEZ, C., Adsorption of Cibacron Yellow F-4G dye onto activated carbons obtained from peanut hull and rice husk: Kinetics and equilibrium studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, **12**(3), pp. 1125-1141. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00806-x>

15. MACAS CHAMBA, Á.P. and RODRÍGUEZ, M.E. *Evaluación de la capacidad biotransformadora de taninos de guarango (Caesalpinia spinosa) a través de Trametes versicolor y Aspergillus niger*. Editorial Universitaria. 2013.
16. RAMÍREZ, C., LÓPEZ, J. and MARTÍNEZ, P. Biorremediación de residuos peligrosos generados en laboratorios de docencia universitaria. *Revista de Biotecnología Ambiental*, 2019, **10**(1), pp. 81-85. Disponible en: <https://doi.org/10.xxxx/rba.2019.10.1.81>
17. LIRA PÉREZ, J., 2021. *Efecto de la fuente de carbono y hierro en la producción de ácidos orgánicos por hongos filamentosos y en la degradación de colorantes* [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
18. ARANA CUENCA, A., BECERRA A., J. and BARRIOS G., M. Decoloración enzimática de colorantes comerciales. In: *XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería*. Zempoala, México. 2019.
19. SÁNCHEZ SILVA, F.G., 2019. *Evaluación in vitro de la actividad antifúngica de extractos puros de Psidium guajava y Maytenus laevis y sus mezclas contra Rhizopus stolonifer y Aspergillus niger* [Tesis de Grado]. Universidad Estatal Amazónica.
20. HERNÁNDEZ, I.J., Revisión bibliográfica: la quitosana: un producto bioactivo de diversas aplicaciones. *Tecnología Química*, 2004, **25**(3), pp. 97-110.
21. ANDRADE-HOYOS, P., SILVA-ROJAS, H.V. and ROMERO-ARENAS, O. Beneficios ecológicos y biológicos del hongo cosmopolita *Trichoderma* spp. en la agricultura: Una perspectiva en el campo mexicano. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 2023, **55**(4), pp. 366-377. Disponible en: <https://doi.org/10.xxxx/rmf.2023.55.4.366>

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no hay conflictos de interés

Contribución de cada autor al artículo

Lázara Fonseca Tresord: revisión bibliográfica, participación activa en la discusión de los resultados.

Reynaldo Antonio Maestigues Palanco: diseño de la investigación, revisión bibliográfica, escritura del artículo, participación activa en la discusión de los resultados, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Juan Carlos Ferrer Romero: diseño de la investigación, revisión bibliográfica, discusión de los resultados, revisión y aprobación de la versión final del trabajo.

Siannah María Mas Diego: diseño de la investigación, revisión bibliográfica, discusión de los resultados, corrección del artículo, revisión y aprobación versión final del trabajo.