VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Impacto de tintas modernas en la biodegradación microbiana del papel

Impact of modern inks on the microbial biodegradation of paper

Cristian Uriel López Ramírez[1], Daniel Esparza Lemus[2], Karlo Gael Zamudio López[3], Abraham Rogel Ascencio[4], Perla Sarahí Díaz Contreras[5], Yelsi Natali Cisneros Almanza[6], César Augusto Linares López[7], Edgar Isaac Rojas Bedolla[8]
Escuela de Nivel Medio Superior de Moroleón, Universidad de Guanajuato.
cu.lopezramirez@ugto.mx[1], d.esparzalemus@ugto.mx[2], kg.zamudiolopez@ugto.mx[3], a.rogelascencio@ugto.mx[4], ps.diazcontreras@ugto.mx[5], yn.cisnerosalmaza@ugto.mx[6], cesar.linares@ugto.mx[7], ei.rojasbedolla@ugto.mx[8]

Resumen

La biodegradación del papel puede verse influenciada por los componentes de las tintas de impresión; sin embargo, su efecto durante las etapas iniciales del proceso aún no está claramente establecido. En este estudio se evaluó el efecto de tinta de inyección, tóner y tinta de bolígrafo sobre la biodegradación de papel bond inoculado con una suspensión de suelo. Se comparó la masa seca inicial y final de las muestras y se realizaron observaciones macroscópicas y microscópicas de la alteración superficial. Todos los tratamientos presentaron incrementos significativos en la masa seca final respecto a la inicial, lo que sugiere la incorporación de biomasa microbiana y partículas del suelo adheridas a las fibras del papel. Además, se observaron alteraciones superficiales y agregados microscópicos en todos los tratamientos, sin diferencias morfológicas evidentes asociadas al tipo de tinta. Los resultados indican que las tintas no inhibieron el establecimiento inicial de la microbiota y que la biodegradación se encontraba en una fase temprana de colonización.

Palabras clave: tintas; biodegradación; papel; microbiana.

Introducción

El papel constituye uno de los residuos sólidos de mayor generación a nivel mundial debido a su amplio uso en actividades educativas, comerciales y administrativas. Al estar compuesto principalmente por fibras de celulosa, se considera un material biodegradable que puede ser degradado por bacterias y hongos presentes en el ambiente, incorporándose nuevamente a los ciclos naturales del carbono. Sin embargo, la velocidad y el grado de biodegradación dependen no solo de la composición del papel, sino también de los aditivos químicos incorporados durante su fabricación y uso[1,2].

Entre estos aditivos destacan las tintas de impresión y escritura, las cuales contienen mezclas complejas de colorantes o pigmentos, resinas, solventes y otros compuestos diseñados para proporcionar estabilidad, adherencia y resistencia al desgaste. Aunque el impacto de estos componentes ha sido ampliamente estudiado en procesos de reciclaje y recuperación de materiales, existe relativamente poca información experimental acerca de su influencia sobre la biodegradación microbiana del papel una vez que éste es desechado. Comprender esta interacción resulta relevante para mejorar la evaluación ambiental de los productos impresos y promover estrategias de manejo más sostenibles[3,4].

[1] Erdal & Hakkarainen, 2022.

[2] Kwon *et al*., 2024.

[3] Guo *et al*., 2024.

[4] Priyanti *et al*., 2024 .

En este contexto, el presente trabajo evaluó experimentalmente el efecto de diferentes tintas comerciales (impresión láser, inyección de tinta y tinta de bolígrafo) sobre la biodegradación del papel bond mediante indicadores como la pérdida de masa, el crecimiento microbiano y cambios físicos durante un proceso de incubación controlado. Los resultados buscan aportar evidencia sobre el posible papel de las tintas en la degradación de uno de los materiales celulósicos de mayor consumo cotidiano.

Metodología

Tipo de papel utilizado

Se utilizó papel bond tamaño carta (21.59 cm X 27.94 cm) para impresión y fotocopiado en alta resolución, con alto nivel de blancura (99 % ISO) y un peso de 78 g/m^2.

Tratamientos

Se prepararon cuatro tratamientos: papel sin tinta (control), papel impreso con tinta de inyección, papel impreso con tóner láser y papel con tinta de bolígrafo. Para cada tratamiento, excepto el control se imprimió/trazó (en el caso de tinta de bolígrafo) un cuadrado de 5 × 5 cm con 9 líneas interiores verticales y 9 horizontales. Por lo que la rejilla resultante tiene 10 filas × 10 columnas, para un total de 100 celdas, cada una de aproximadamente 0.5 × 0.5 cm (Figura 1). Estos cuadrados fueron recortados, obteniéndose 16 cuadrados (muestras) de cada tratamiento, los cuales fueron sometidos a un secado por 24 horas a 40 ºC y se registró su masa antes de iniciar el experimento.

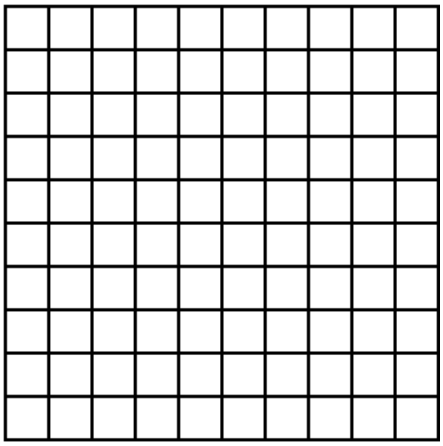


Figura 1. Patrón de rejilla.

Inoculación e incubación de muestras

Como fuente de microorganismos se utilizó un inóculo obtenido a partir de una suspensión de 20 g de suelo en 200 ml de agua destilada. Cada muestra se inoculó con 3 ml de suspensión en condiciones asépticas. Posteriormente, los papeles se incubaron durante aproximadamente 45 días a temperatura controlada de 29 ºC, revisando diariamente la humedad y rehidratando con agua estéril en caso de ser necesario.

Resultados

Los cuatro tratamientos evaluados (papel sin tinta, tinta de inyección, tóner y tinta de bolígrafo) presentaron evidencias de alteración superficial al término del periodo de incubación. Se observaron manchas amarillas y café, así como pequeños puntos oscuros distribuidos de manera irregular sobre la superficie del papel. Las diferencias entre tratamientos fueron poco marcadas, aunque el papel sin tinta y el papel con tinta de bolígrafo mostraron una alteración visual ligeramente mayor que las muestras con tóner y tinta de inyección (Figura 2).

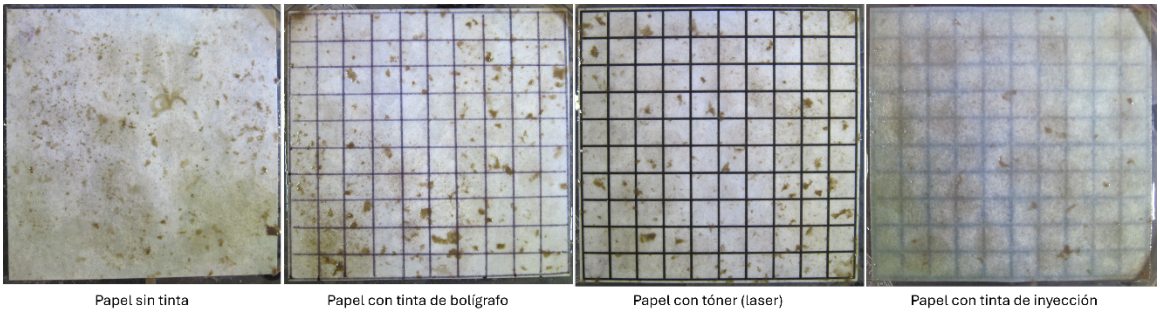


Figura 2. Aspecto físico de las muestras al final del periodo de incubación.

Las observaciones microscópicas (10x y 40x) revelaron un patrón semejante en todos los tratamientos, caracterizado por la presencia de partículas oscuras y agregados adheridos a las fibras de celulosa, sin diferencias morfológicas evidentes asociadas al tipo de tinta. No se observaron estructuras compatibles con un crecimiento abundante de hongos filamentosos, como micelio superficial o redes extensas de hifas. Únicamente en una muestra del tratamiento control se detectó un agregado verde aislado (40×), compatible con un organismo presente incidentalmente en el inóculo del suelo.

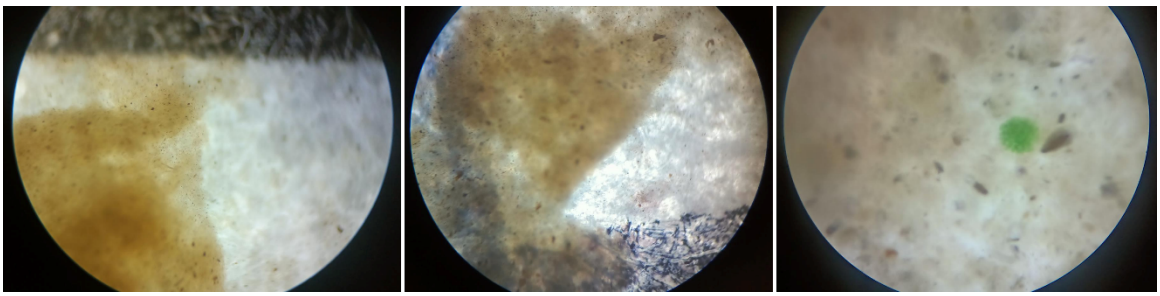


Figura 3. Observación de muestras al microscopio.

El análisis de la masa de las muestras mostró un comportamiento diferente al esperado. En lugar de registrarse una disminución, se observó un incremento significativo entre la masa inicial y la masa final en los tratamientos con tinta de inyección ($p = 0.046$), tóner ($p = 0.050$) y papel sin tinta ($p < 0.001$). El tratamiento con tinta de bolígrafo presentó un incremento similar, aunque sin alcanzar significancia estadística ($p = 0.064$). En todos los casos la masa final fue superior a la inicial.

En conjunto, los resultados indican que todas las muestras experimentaron modificaciones superficiales compatibles con las primeras etapas de biodegradación, acompañadas de un aumento de la masa seca, pero sin evidencia de pérdida de material celulósico[5].

[5] Lynd *et al.*, 2002.

Discusión

Los resultados obtenidos indican que el papel bond experimentó modificaciones superficiales después de la incubación con suspensión de suelo, evidenciadas por la aparición de manchas, cambios en la textura y alteraciones microscópicas sobre las fibras de celulosa. Sin embargo, a diferencia de lo esperado para fases avanzadas de biodegradación, las muestras no mostraron pérdida de masa; por el contrario, la mayoría de los tratamientos presentó un incremento estadísticamente significativo de la masa final respecto a la inicial. Este comportamiento sugiere que el proceso se encontraba en una etapa temprana de colonización microbiana, en la cual la acumulación de biomasa y de compuestos extracelulares puede superar la cantidad de celulosa degradada[5,6].

Durante las primeras fases de biodegradación, los microorganismos forman biopelículas sobre la superficie del sustrato y producen polisacáridos extracelulares que facilitan su adhesión y retención de agua. Además, partículas minerales del suelo pueden quedar firmemente adheridas a dichas biopelículas. Estos procesos incrementan ligeramente la masa seca aparente del material antes de que la degradación enzimática produzca una pérdida neta de celulosa[7,8]. Por ello, el incremento de masa observado en este estudio constituye un indicador compatible con el establecimiento de comunidades microbianas activas más que con una ausencia de biodegradación.

La comparación entre tratamientos indica que ninguno de los tipos de tinta impidió el establecimiento inicial de la microbiota del suelo. Aunque visualmente el papel sin tinta y el papel con tinta de bolígrafo presentaron una alteración superficial ligeramente mayor, los incrementos de masa fueron estadísticamente significativos en prácticamente todos los tratamientos. Estos resultados sugieren que las tintas evaluadas no constituyen una barrera importante para la colonización inicial de la superficie del papel, coincidiendo con lo descrito por Bajpai[9], quien señala que la biodegradación del papel depende principalmente de la accesibilidad de la celulosa y de las condiciones ambientales, mientras que las tintas pueden modificar la velocidad del proceso sin impedirlo completamente.

Las observaciones microscópicas mostraron partículas y agregados distribuidos sobre las fibras de celulosa sin diferencias morfológicas evidentes entre tratamientos. La ausencia de estructuras compatibles con un crecimiento abundante de hongos filamentosos sugiere que la colonización inicial pudo estar dominada por bacterias y otros microorganismos propios del suelo. Esta sucesión microbiana ha sido ampliamente documentada durante las primeras etapas de degradación de residuos lignocelulósicos[5,10].

Es importante considerar que el experimento presentó limitaciones relacionadas con la disminución de la humedad durante la incubación, situación que hizo necesaria una reinoculación para restablecer la actividad microbiana. La humedad es uno de los factores que mayor influencia ejercen sobre la actividad enzimática de los microorganismos degradadores de celulosa, por lo que variaciones en este parámetro pueden retrasar la degradación del polímero aun cuando la colonización superficial ya se haya establecido[6,11].

En conjunto, los resultados muestran que la combinación de la observación macroscópica, el análisis microscópico y la determinación de la masa permitió caracterizar adecuadamente una fase temprana de biodegradación. Mientras la observación y la microscopía evidenciaron el establecimiento de alteraciones superficiales, el incremento de masa aportó evidencia indirecta de colonización microbiana y formación de biopelículas, confirmando que la pérdida de masa no siempre constituye el primer indicador del inicio de la biodegradación[7,11].

---

[6] Prescott *et al.*, 2017.

[7] Flemming & Wingender, 2010.

[8] Madigan *et al.*, 2021.

[9] Bajpai, 2018.

[10] Crawford, 1981.

[11] Tuomela *et al.*, 2000.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Conclusiones

Bajo las condiciones experimentales evaluadas, el papel bond inició un proceso de biodegradación independientemente del tipo de tinta presente. Todos los tratamientos desarrollaron alteraciones superficiales visibles y agregados microscópicos compatibles con una colonización microbiana temprana. Contrario a lo esperado, las muestras no perdieron masa, sino que presentaron un incremento significativo en la mayoría de los tratamientos, probablemente asociado a la acumulación de biomasa microbiana, biopelículas y partículas del suelo adheridas a las fibras del papel. Estos resultados indican que las tintas de inyección, tóner y bolígrafo no inhibieron el establecimiento inicial de la microbiota del suelo durante el periodo estudiado.

Referencias

Bajpai, P. (2018). Recycling and deinking of recovered paper. *Elsevier*.

Crawford, R. L. (1981). *Lignin biodegradation and transformation.* John Wiley & Sons.

Erdal, N. B., & Hakkarainen, M. (2022). Degradation of cellulose derivatives in laboratory, man-made, and natural environments. *Biomacromolecules*, *23*(7), 2713-2729.

Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology, 8*(9), 623–633. https://doi.org/10.1038/nrmicro2415

Guo, J., Luo, C., Chong, Z. K., Alassali, A., & Kuchta, K. (2024). Thermal degradation and hydrolysis depolymerization of printing ink components for plastic packaging in recycling processes: a review. *Frontiers of environmental science & engineering*, *18*(10), 128.

Kwon, S., Meza, L., Pawlak, J. J., & Venditti, R. A. (2024). Effect of Paper-making Additives on Biodegradation of Lignocellulosic Fibers. *BioResources*, *19*(4), 8028.

Lynd, L. R., Weimer, P. J., van Zyl, W. H., & Pretorius, I. S. (2002). Microbial cellulose utilization: Fundamentals and biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews, 66*(3), 506–577. https://doi.org/10.1128/MMBR.66.3.506-577.2002

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2021). *Brock biology of microorganisms* (16th ed.). Pearson.

Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. (2017). *Microbiología* (10.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Priyanti, I., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W., Hosemann, P., & Assabumrungrat, S. (2024). Corona discharge plasma for green de-inking of inkjet printer ink. *Scientific Reports*, *14*(1), 13035.

Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., & Itävaara, M. (2000). Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. *Bioresource Technology, 72*(2), 169–183. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2