

Adherencia de *Escherichia coli* Patógena a Superficies Agrícolas en la Producción de Melón Honeydew: Formación Potencial de Biopelículas

Adherence of Pathogenic *Escherichia coli* to Agricultural Surfaces in Honeydew Melon Production: Potential Biofilm Formation

Enciso Martínez Yessica¹, Sepúlveda Moreno César O.², Barrios Villa Edwin¹, Valencia Rivera Dora E.¹, Ayala Zavala J. Fernando³, Barajas Urías Karla F.¹, Ballesteros Monrreal Manuel G.^{1*}

¹ Departamento de Ciencias Químico-Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Sonora, Avenida Universidad e Irigoyen S/N, H. Caborca, Sonora, México, 83621.

² Departamento de Ciencias Económico-Administrativas, Universidad de Sonora, Avenida Universidad e Irigoyen S/N, H. Caborca, Sonora, México, 83621.

³ Coordinación de Tecnología de Alimentos de Origen Vegetal, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas 46, Hermosillo, Sonora, México, 83304.

*Autor para la correspondencia: Manuel G. Ballesteros Monrreal manuel.ballesteros@unison.mx

Resumen

El consumo de melón Honeydew ha crecido a nivel mundial; sin embargo, su producción puede representar un riesgo para la salud pública si se contamina con bacterias patógenas como *Escherichia coli*, capaces de formar biopelículas en superficies agrícolas. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de adherencia de cepas patógenas de *E. coli* aisladas de distintos puntos del sistema de producción de melón Honeydew en Hermosillo, Sonora, sobre materiales comúnmente utilizados en la cosecha y empaque. Se seleccionaron cuatro cepas representativas y una cepa control, y se evaluó su adherencia sobre cartón, polietileno, polipropileno y cáscara de melón durante diferentes tiempos de contacto (3, 6, 12 y 24 horas). La cuantificación se realizó mediante técnicas microbiológicas estándar y análisis estadístico utilizando ANOVA de un factor y regresión lineal múltiple. Los resultados indicaron que el tipo de cepa no tuvo un efecto significativo en la adherencia, mientras que la superficie y el tiempo sí fueron factores determinantes. Las superficies de polipropileno y polietileno mostraron significativamente menor retención bacteriana. Estos hallazgos destacan la importancia del tipo de material en la formación de biopelículas, y sugieren que el uso de superficies con menor afinidad bacteriana podría contribuir a mejorar la inocuidad alimentaria, especialmente en etapas críticas de la cosecha y empaque.

Palabras clave: Biopelículas, *Escherichia coli*, superficies agrícolas.

Abstract

The consumption of Honeydew melon has increased worldwide; however, its production can pose a public health risk if contaminated with pathogenic bacteria such as *Escherichia coli*, which can form biofilms on agricultural surfaces. The objective of this study was to evaluate the adhesion capacity of pathogenic *E. coli* strains isolated from different points in the Honeydew melon production system in Hermosillo, Sonora, on materials commonly used during harvest and packing. Four representative strains and one control strain were selected, and their Adhesion was assessed on cardboard, polyethylene, polypropylene, and melon rind at different contact times (3, 6, 12, and 24 hours). Quantification was performed using standard microbiological techniques and statistical analysis, including one-way ANOVA and multiple linear regression. The results indicated that the type of strain did not have a significant effect on Adhesion, whereas surface type and contact time were determining factors. Polypropylene and polyethylene surfaces showed significantly lower bacterial retention. These findings underscore the significance of surface material in biofilm formation, suggesting that the use of low-bacterial-affinity materials may enhance food safety, particularly during the harvesting and packing stages.

Keywords: Biofilm, *Escherichia coli*, agricultural surfaces.

DOI: 10.46588/invurnus.v20i1.129

Recibido 01/08/2025

Aceptado 07/08/2025

Publicado 11/08/2025

Introducción

El consumo de frutas frescas, como el melón Honeydew, ha aumentado en todo el mundo gracias a su sabor agradable, alto valor nutritivo y beneficios para la salud. Sin embargo, junto con su popularidad, también ha crecido la preocupación por su seguridad microbiológica, especialmente cuando estos productos se contaminan con bacterias capaces de causar enfermedades (Aladhadh, 2023). Una de las bacterias más estudiadas en este contexto es *Escherichia coli*, un microorganismo que habita normalmente en el intestino humano y animal. Aunque muchas de sus cepas son inofensivas, otras son consideradas patógenas y pueden provocar infecciones gastrointestinales severas, particularmente en poblaciones vulnerables (Nasrollahian, Graham, & Halaji, 2024). Estas cepas pueden llegar a los alimentos a través del agua de riego, el suelo, los utensilios, los equipos de empaque o incluso el contacto humano durante la cosecha y manipulación (Enciso et al., 2022; Omotosho et al., 2024).

Una característica que hace especialmente preocupante a ciertas cepas de *E. coli* patógena es su capacidad de formar biopelículas en alimentos, superficies y equipos de la industria alimentaria (Sadeghzadeh et al., 2024). Estas biopelículas son estructuras complejas que se originan cuando las bacterias se adhieren a una superficie y comienzan a producir una matriz protectora compuesta por sustancias como polisacáridos, proteínas, lípidos y fragmentos de ADN. Esta matriz extracelular funciona como una barrera física que no solo mantiene unidas a las células bacterianas, sino que también les permite resistir condiciones adversas, como la desecación, la acción de agentes desinfectantes y ciertos antibióticos (Elafify et al., 2024). Gracias a esta estrategia, las bacterias que forman biopelículas pueden persistir durante largos periodos en entornos agrícolas y de procesamiento, aumentando el riesgo de contaminación cruzada.

Diversos estudios han documentado la presencia de *E. coli* en superficies clave del entorno agrícola. Por ejemplo, Igbinosa et al. (2023) reportaron cepas de *E. coli* en diversas granjas agrícolas de Edo, Nigeria, con una prevalencia del 68 % en muestras de suelo, 28 % en agua de riego y 24.4 % en vegetales. De manera similar, Enciso et al. (2022) detectaron *E. coli* en el 7.2 % de las muestras recolectadas a lo largo de la cadena de producción de melón Honeydew en Sonora, México, incluyendo agua de riego, melones cosechados, manos de los trabajadores del empaque, cajas y melones de rezaga. En el norte de México, Corzo et al. (2019) identificaron la presencia de *E. coli* en granjas e instalaciones de empaque de chile jalapeño, tomate y melón. Las prevalencias fueron del 19.9 % en agua de riego, 24.9 % en fuentes de agua, 15.2 % en manos de trabajadores de cosecha, 8.8 % en manos de trabajadores de distribución, 2.6 % en manos de trabajadores de empaque y 5.6 % en suelo. Asimismo, en Portugal, Araújo et al. (2017) aislaron *E. coli* en el 50 % de las muestras de agua de riego y en el 38 % de vegetales recolectados en pequeñas granjas familiares de Estarreja.

Aunque existen múltiples estudios que evidencian la presencia de *E. coli* en diferentes etapas de la producción agrícola, son limitados los que analizan detalladamente su comportamiento en cuanto a la adherencia a superficies específicas que forman parte de la cadena de producción del melón Honeydew, como cajas, mesas, plásticos o la propia cáscara del fruto. Esta fruta es ampliamente cultivada y exportada desde el noroeste de México, lo que convierte a su producción en un punto clave para la seguridad alimentaria regional e internacional. Comprender si las cepas patógenas de *E. coli* presentes en este sistema tienen la capacidad de formar biopelículas en distintos materiales puede ayudar a identificar puntos críticos de control y mejorar los procesos de higiene.



Materiales y métodos

Este estudio se desarrolló a partir de una investigación previa realizada en Hermosillo, Sonora, México, enfocada en identificar los reservorios ambientales de *E. coli* en la cadena de producción de melón Honeydew (Enciso et al., 2022). En dicho trabajo se recolectaron 445 muestras ambientales, de las cuales se aislaron 32 cepas de *E. coli* provenientes de agua de represo, melones cosechados, manos de trabajadores del empaque, cajas de cartón y melones descartados (de rezaga).

Para evaluar la capacidad de adherencia de cepas patógenas de *E. coli* a distintas superficies presentes en el sistema agrícola, se seleccionaron cuatro cepas representativas aisladas de puntos críticos del proceso productivo: A34 y A35-2 (ambas provenientes del agua de riego), MR11 (aislada de melones de rezaga) y C49 (proveniente de cajas de empaque). Como control positivo se utilizó la cepa de referencia *E. coli* ATCC 700416 y como negativo las diferentes superficies sin contacto con la bacteria (polietileno, polipropileno, cartón y superficie del melón Honeydew). Estas cepas fueron seleccionadas debido a sus características de relevancia clínica y microbiológica (Tabla 1), como la presencia de genes de resistencia a antibióticos, así como patrones de multiresistencia frente a distintos grupos antimicrobianos, incluyendo cefalosporinas, carbapenémicos y fluoroquinolonas. Además, correspondían a diferentes grupos filogenéticos y patotipos, específicamente *E. coli* enteropatógena atípica/Shiga-toxigénica (aEPEC/STEC) y *E. coli* Shiga-toxigénica (STEC), estas son de gran importancia porque causan diversas enfermedades.

Tabla 1. Características de las cepas A34, A35-2, MR-11 y C49 de *E. coli* utilizadas para evaluar la capacidad de adherencia.

Cepa	Fuente	Resistotipo	Genes BLEE	Genes no-BLEE	Grupo filogenético	Patotipo	Serotipo	Virotipo	PAI
A34	Agua del represo	CTX, CXM, CRO, AMP, FEP, AMC, CIP, MEM, SXT, ETP	<i>bla_{CTX-M151}</i>	0	B2	aEPEC/STEC	H: O?***	0	0
A35-2	Agua del represo	CTX, ATM, CXM, CRO, AMP, FEP, AMC, AN, CIP, MEM, SXT, ETP	<i>bla_{TEM}</i>	0	B2	STEC	H:-O129	<i>afa_{Dra/BC}</i>	0
MR11	Melón de rezaga	CTX, CXM, CRO, AMP, FEP, AMC, AN, CIP, MEM, ETP	0	0	Desconocido	aEPEC/STEC	H?:0153	0	0
C49	Caja de empaque	CTX, CXM, CRO, AMP, FEP, AMC, ETP	0	0	A	STEC	H67:O?	0	0

O**: Antígeno somático relacionado con *Shigella boydii* 16; CXM: cefuroxima; CTX: cefotaxima; CRO: ceftriaxona; FEP: cefepima; MEM: meropenem; ETP: ertapenem; AMC: amoxicilina/ácido clavulánico; AMP: ampicilina; CIP: ciprofloxacino; ATM: aztreonam; AN: amikacina; SXT: sulfametaxol/ trimetoprim; BLEE: betalactamasas de espectro extendido; aEPEC/STEC: *E. coli* enteropatógena atípica/Shiga-toxigénica; STEC: *E. coli* Shiga-toxigénica PAI: islas de patogenicidad.



Para reproducir las condiciones de contacto entre las bacterias y las superficies presentes en el entorno agrícola, se llevó a cabo el siguiente protocolo experimental (Gutiérrez et al.; 2018):

1. Se ajustó la concentración del inóculo de las cepas *E. coli* (A34, A35-2, MR-11, C-49 y ATCC 700416) en caldo Luria-Bertani (LB) hasta alcanzar una densidad de 1×10^6 UFC/mL.
2. Se prepararon tubos de ensayo con 6 mL de caldo LB inoculado con cada cepa previamente ajustada. Para el control negativo, se utilizó exclusivamente solución salina estéril (0.9%).
3. A cada tubo se le añadió un cupón de 1×1 cm correspondiente al tipo de superficie evaluada: polietileno, polipropileno, cartón o superficie del melón Honeydew.
4. Los tubos se incubaron a 37 °C durante diferentes tiempos de exposición: 3, 6, 12 y 24 horas.
5. Transcurrido el tiempo de incubación, los cupones se retiraron cuidadosamente, se lavaron con 2 mL de solución salina estéril para eliminar células no adheridas. Posteriormente, se sometieron a un baño ultrasónico durante 5 minutos (40 kHz, Branson 2510 sonicator, CT, EE.UU) en 3 mL de solución salina estéril con el fin de desprender las células bacterianas adheridas a la superficie.
6. La cuantificación de las células adheridas se llevó a cabo mediante la realización de diluciones seriadas y siembra en placas con agar LB, incubadas por 16 horas a 37 °C. Finalmente, se calcularon las unidades formadoras de colonias por centímetro cuadrado (UFC/cm²). Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

El presente estudio adoptó un diseño experimental, con enfoque cuantitativo y alcance explicativo, orientado a analizar la adherencia de *E. coli* en distintas superficies bajo condiciones controladas. La variable dependiente fue log UFC/cm². Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva e inferencial. La normalidad de los residuos se verificó mediante un gráfico P-P de probabilidad normal estandarizada, que mostró alineación cercana a la diagonal esperada. Aunque no se incluyó una prueba de Levene, se utilizó la prueba robusta de Welch, la cual resultó significativa ($F = 7.981$, $gl_1 = 3$, $gl_2 = 41.472$, $p < 0.001$), lo que sugiere heterogeneidad de varianzas y valida el uso del ANOVA y pruebas post hoc robustas. Se aplicó un ANOVA de un factor para evaluar diferencias de adherencia entre cuatro tipos de superficie (polipropileno, polietileno, cartón y melón), encontrándose diferencias estadísticamente significativas ($F = 7.539$, $p < .001$). La prueba post hoc de Tukey reveló diferencias significativas entre varias combinaciones de superficies (por ejemplo, polipropileno vs. melón, $p = 0.002$). Se realizó un análisis ANOVA para evaluar diferencias en la adherencia bacteriana entre cinco cepas, sin encontrar resultados estadísticamente significativos ($F = 0.949$, $p = 0.441$). La prueba robusta de Welch confirmó estos hallazgos ($F = 0.761$, $p = 0.557$). Las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey tampoco mostraron diferencias significativas entre pares de cepas ($p > 0.05$). También se ejecutó una regresión lineal múltiple por pasos con los predictores tiempo, polipropileno, polietileno y C-49. El modelo final explicó el 64.2% de la varianza (R^2 ajustado = 0.642), siendo significativo ($p < .001$). La colinealidad fue descartada mediante valores de VIF < 1.5 y tolerancias > 0.667 . Todos los análisis se realizaron con el software IBM SPSS Statistics (versión 27), y se estableció un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.



Resultados y Discusión

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de determinar si existían diferencias significativas en la capacidad de adherencia de *E. coli* en función de dos factores: la cepa bacteriana y el tipo de superficie evaluada. Adicionalmente, se construyeron diagramas de caja (boxplots) para visualizar la distribución de la adherencia bacteriana, expresada en log UFC/cm², según cada cepa y superficie de contacto. En los gráficos, una línea roja horizontal indica la mediana general del conjunto de datos, sirviendo como referencia para identificar desviaciones respecto a la tendencia central.

En primer lugar, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar posibles diferencias en la capacidad de adherencia bacteriana entre las cinco cepas de *E. coli* incluidas en el estudio. Los resultados no revelaron diferencias estadísticamente significativas ($F = 0.949$, $p = 0.441$), lo que indica que, en las condiciones evaluadas, la cepa bacteriana no tuvo un efecto determinante en la cantidad de bacterias adheridas a las superficies (Figura 1). Este hallazgo sugiere que la capacidad de adherencia no estuvo necesariamente relacionada con la identidad genética de las cepas, sino más bien con otros factores del entorno experimental, como el tipo de superficie o el tiempo de contacto. Esta interpretación es coherente con lo reportado por Hufnagel, Depas y Chapman (2015), quienes argumentan que la formación de biopelículas en *E. coli* depende principalmente de la expresión de estructuras extracelulares como *curli* y celulosa, más que de su perfil filogenético.

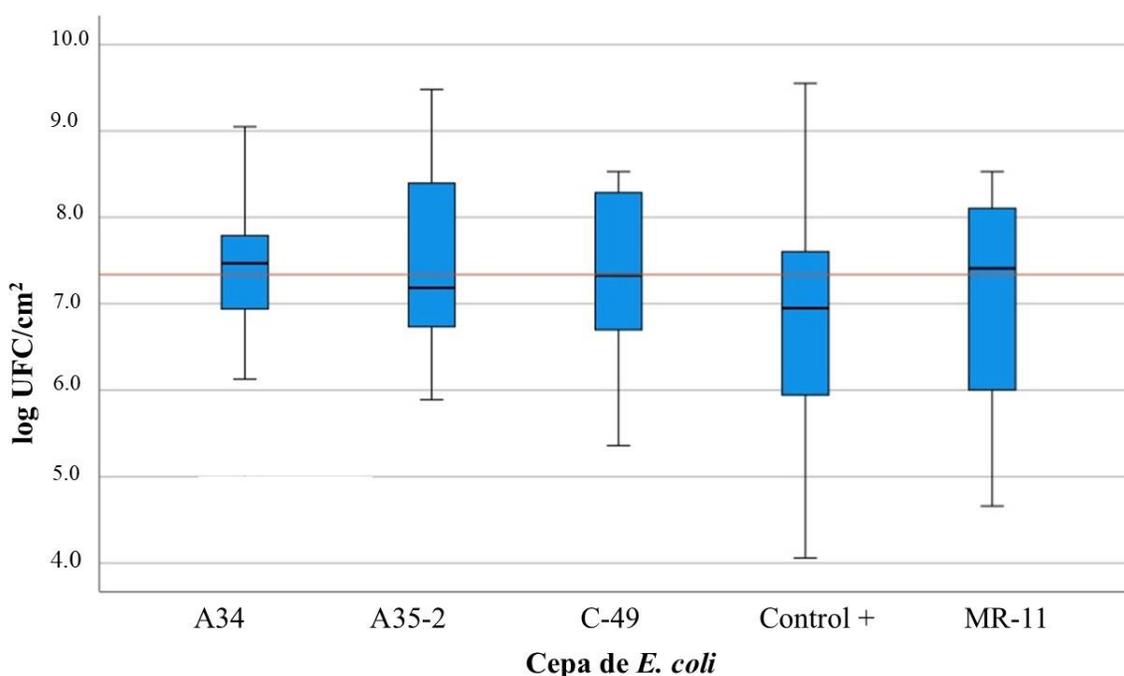


Figura 1. Capacidad de adherencia de las cepas de *E. coli* (A34, A35-2, C-49, Control +, MR-11).

A pesar de la falta de significancia estadística, los diagramas de caja revelaron algunas tendencias interesantes. Las cepas C-49 y MR-11 presentaron medianas por encima del valor medio general, lo que sugiere una mayor capacidad de adherencia en determinadas condiciones. En contraste, la cepa A34 mostró una mediana cercana al promedio general, pero con presencia de valores atípicos bajos, lo que refleja un comportamiento más variable. La cepa A35-2 presentó una tendencia central similar, sin evidenciar valores



extremos. Sin embargo, la cepa del grupo Control+ exhibió una mediana ligeramente inferior a la media general. Aunque estas diferencias no alcanzaron significancia estadística, aportan indicios de variabilidad fenotípica entre cepas que podrían estar asociadas a factores de virulencia específicos, como adhesinas o estructuras relacionadas con la formación de biopelículas, cuya evaluación quedaría como línea futura de investigación.

Por el contrario, al analizar la influencia del tipo de superficie, se observaron diferencias significativas en la capacidad de adherencia bacteriana ($p < 0.001$). La superficie de cartón presentó una mediana superior a la media general, junto con un amplio rango intercuartílico (RIC), lo que sugiere una alta variabilidad y niveles elevados de adherencia (Figura 2). De manera similar, la cáscara de melón mostró una mediana elevada y una dispersión considerable en los datos, indicando que, aunque presenta alta adherencia, esta puede fluctuar dependiendo de las condiciones o cepas involucradas. En contraste, los materiales sintéticos como el polietileno y el polipropileno exhibieron las medianas más bajas. En particular, el polipropileno mostró el valor central más reducido y un RIC moderado, lo que sugiere niveles de adherencia bajos y consistentes. Estos resultados confirman que el tipo de material tiene un efecto determinante en la adherencia de *E. coli*, siendo algunas superficies considerablemente más propensas que otras a favorecer la formación de biopelículas.

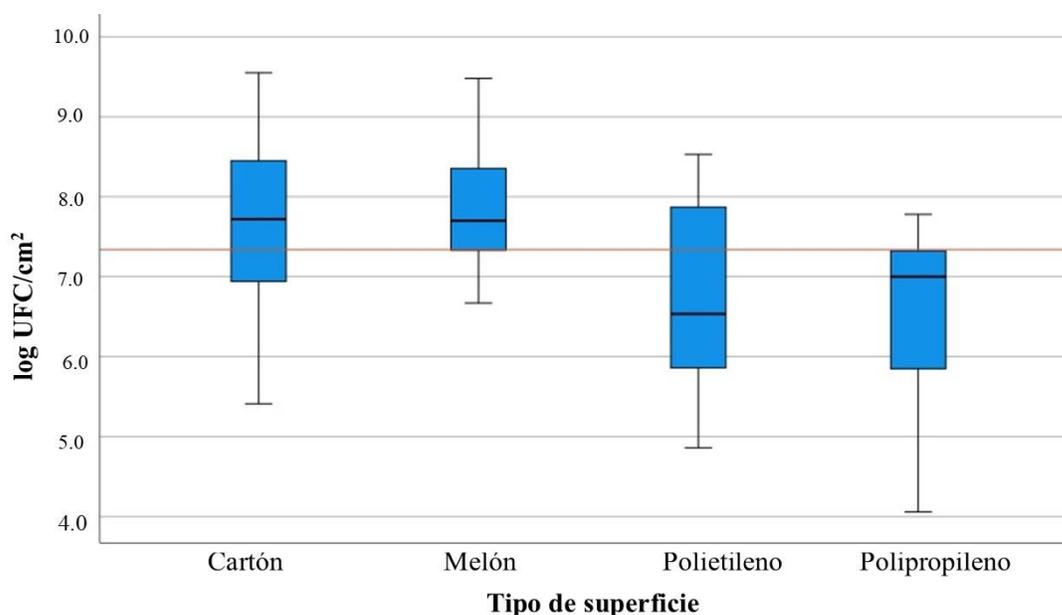


Figura 2. Adherencia bacteriana de *E. coli* en diferentes superficies (cartón, cáscara de melón, polietileno y polipropileno).

Estos resultados son consistentes con múltiples investigaciones que destacan la influencia de las propiedades físico-químicas y topográficas de los materiales en la adhesión bacteriana. Por ejemplo, Yuan et al. (2017) demostraron que superficies plásticas lisas e hidrofóbicas presentan menor fracción de área efectiva de contacto, lo que limita la capacidad de anclaje de *E. coli*. De igual manera, Helbig et al. (2016) señalaron que las topografías microscópicas menores al tamaño celular reducen significativamente la adhesión, independientemente del tiempo de contacto o la hidrofobicidad.



Por otra parte, Oh et al. (2018) mostraron que la química superficial, particularmente el potencial zeta y el grado de hidrofobicidad, modula la cinética de adhesión bacteriana. En superficies como el polietileno y el polipropileno, la baja energía superficial y la carga negativa dificultan el establecimiento inicial de microcolonias, lo cual es congruente con los niveles más bajos de adherencia observados en nuestro estudio. Adicionalmente, se ha documentado que la rugosidad superficial (Mu et al., 2023) y la motilidad bacteriana (Abdulkadieva et al., 2022; Gu et al., 2016) también son factores determinantes en el asentamiento celular y la formación de biopelículas. Si bien estas variables no fueron medidas directamente en el presente estudio, su influencia es plausible dada la diferencia de comportamiento observada entre superficies rugosas como el cartón y la cáscara de melón frente a las superficies lisas de los polímeros.

Para complementar este análisis, se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple por pasos, en el cual se identificaron las variables que mejor explican la adherencia bacteriana medida en log UFC/cm² (Tabla 2). El modelo, que incluyó como predictores el tiempo de contacto, las superficies de polietileno y polipropileno, así como la cepa C-49, resultó ser el más explicativo y estadísticamente robusto ($p < 0.01$ para todos los predictores).

Tabla 2. Modelo estadísticamente robusto ($p < 0.01$ para todos los predictores).

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		Sig.
	β	Desv. Error	Beta (B)	t	
(Constante)	6.813	0.161		42.232	0.000
Tiempo	0.092	0.010	0.632	9.377	0.000
Polipropileno	-1.206	0.193	-0.447	-6.261	0.000
Polietileno	-1.007	0.193	-0.373	-5.226	0.000
C-49	-0.527	0.197	-0.181	-2.681	0.009

Variable dependiente: log UFC/cm²

El modelo final incluyó cuatro predictores significativos:

1. Tiempo de contacto

Fue el factor más influyente del modelo ($\beta = 0.632$, $p < 0.001$), indicando que a medida que aumenta el tiempo de exposición de las bacterias a una superficie, también se incrementa su capacidad de adherirse. Este resultado es coherente con la dinámica natural de formación de biopelículas, en la que la adhesión inicial es seguida por una maduración progresiva de la comunidad microbiana.

2. Superficie de polipropileno

Este material mostró un efecto negativo significativo sobre la adherencia bacteriana, sugiriendo que presenta menor afinidad para la retención de *E. coli* en comparación con la superficie de referencia (probablemente cartón o melón). Su naturaleza hidrofóbica y lisa podría estar limitando la interacción inicial entre la superficie y las células bacterianas, lo que se alinea con estudios previos que han reportado baja retención microbiana en polímeros similares (Galié et al., 2018).



3. Superficie de polietileno

Al igual que el polipropileno, esta superficie también presentó una capacidad significativamente reducida de retención bacteriana ($p < 0.001$). La menor rugosidad superficial, junto con propiedades fisicoquímicas poco favorables para la adhesión microbiana, podrían explicar esta observación.

4. Cepa C-49

Esta cepa aislada de cajas de empaque fue la única que mostró una adherencia significativamente menor frente al grupo de referencia, lo cual podría deberse a diferencias en su perfil de expresión de genes relacionados con la adhesión o a su tipo filogenético. Este hallazgo refuerza la idea de que no todas las cepas patógenas de *E. coli* tienen el mismo potencial para formar biopelículas, lo cual es relevante para el diseño de estrategias específicas de control.

Variables no significativas

Otras superficies como el cartón y la cáscara de melón, así como las cepas A34, A35-2, MR11 y la cepa control de *E. coli* ATCC 700416, fueron excluidas del modelo final. Esto se debe a que:

- No mostraron efectos significativos,
- Presentaron colinealidad con otras variables,
- Su inclusión no mejoraba el poder explicativo del modelo.

Este hallazgo indica que, al menos en las condiciones evaluadas, algunas superficies aparentemente más porosas o naturales como el cartón y la cáscara de melón no se comportan de manera homogénea frente a todas las cepas y que su papel en la adherencia bacteriana puede depender de otros factores no explorados en este estudio, como la humedad, la carga electrostática o la composición superficial.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio destacan la importancia del tipo de superficie y del tiempo de exposición como factores clave en la adherencia de *E. coli* y en la posible formación de biopelículas dentro del sistema de producción de melón Honeydew. A diferencia del tipo de cepa, que no mostró diferencias significativas en las condiciones evaluadas, las superficies como polietileno y polipropileno presentaron una menor capacidad de retención bacteriana, lo que podría contribuir a reducir los riesgos de contaminación en productos frescos. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar las propiedades físico-químicas de los materiales utilizados en la cosecha y empaque para mejorar la inocuidad alimentaria. No obstante, aunque no fue el objetivo principal de este estudio, no se descarta la posible participación de factores de virulencia, particularmente adhesinas y genes relacionados con la formación de biopelículas, que podrían influir significativamente en la interacción bacteria-superficie. Con base en los datos obtenidos, el principal condicionante identificado en este modelo fue el tipo de material, sin embargo, se sugiere que futuras investigaciones incluyan el análisis genético de estas cepas para comprender mejor su comportamiento adherente.



Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Sonora por el apoyo brindado a través del programa de Apoyo a Proyectos de Investigación 2025 (clave del proyecto USO413009506), el cual hizo posible la realización de este estudio.

Referencias

1. Abdulkadieva, M. M., Sysolyatina, E. V., Vasilieva, E. V., Gusarov, A. I., Domnin, P. A., Slonova, D. A., Stanishevskiy, Y. M., Vasiliev, M. M., Petrov, O. F., & Ermolaeva, S. A. (2022). Strain specific motility patterns and surface adhesion of virulent and probiotic *Escherichia coli*. *Scientific Reports*, *12*(1), 614. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04592-y>
2. Aladhadh, M. (2023). A review of modern methods for the detection of foodborne pathogens. *Microorganisms*, *11*(5), 1111. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051111>
3. Araújo, S., A.T. Silva, I., Tacão, M., Patinha, C., Alves, A., & Henriques, I. (2017). Characterization of antibiotic resistant and pathogenic *Escherichia coli* in irrigation water and vegetables in household farms. *International Journal of Food Microbiology*, *257*, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.06.020>
4. Corzo-Ariyama, H. A., García-Heredia, A., Heredia, N., García, S., León, J., Jaykus, L., & Solís-Soto, L. (2019). Phylogroups, pathotypes, biofilm formation and antimicrobial resistance of *Escherichia coli* isolates in farms and packing facilities of tomato, jalapeño pepper and cantaloupe from Northern Mexico. *International Journal of Food Microbiology*, *290*, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.10.006>
5. Elafify, M., Liao, X., Feng, J., Ahn, J., & Ding, T. (2024). Biofilm formation in food industries: Challenges and control strategies for food safety. *Food Research International*, *190*, 114650. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114650>
6. Enciso-Martínez, Y., Barrios-Villa, E., Sepúlveda-Moreno, C. O., Ballesteros-Monreal, M. G., Valencia-Rivera, D. E., González-Aguilar, G. A., Martínez-Téllez, M. A., & Ayala-Zavala, J. F. (2022). Prevalence of antibiotic-resistant *E. coli* strains in a local farm and packing facilities of Honeydew melon in Hermosillo, Sonora, Mexico. *Antibiotics*, *11*(12), 1789. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11121789>
7. Galié, S., García-Gutiérrez, C., Miguélez, E. M., Villar, C. J., & Lombó, F. (2018). Biofilms in the food industry: health aspects and control methods. *Frontiers in Microbiology*, *9*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00898>
8. Gu, H., Chen, A., Song, X., Brasch, M. E., Henderson, J. H., & Ren, D. (2016). How *Escherichia coli* lands and forms cell clusters on a surface: a new role of surface topography. *Scientific Reports*, *6*(1), 29516. <https://doi.org/10.1038/srep29516>
9. Gutierrez-Pacheco, M. M., Gonzalez-Aguilar, G. A., Martinez-Tellez, M. A., Lizardi-Mendoza, J., Madera-Santana, T. J., Bernal-Mercado, A. T., Vazquez-Armenta, F. J., & Ayala-Zavala, J. F. (2018). Carvacrol inhibits biofilm formation and production of extracellular polymeric substances of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*. *Food Control*, *89*, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.02.007>
10. Helbig, R., Günther, D., Friedrichs, J., Rößler, F., Lasagni, A., & Werner, C. (2016). The impact of structure dimensions on initial bacterial adhesion. *Biomaterials Science*, *4*(7), 1074–1078. <https://doi.org/10.1039/C6BM00078A>
11. Hufnagel, D. A., Depas, W. H., & Chapman, M. R. (2015). The Biology of the *Escherichia coli* extracellular matrix. *Microbiology Spectrum*, *3*(3). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.MB-0014-2014>
12. Igbinsola, E. O., Beshiru, A., Igbinsola, I. H., Cho, G.-S., & Franz, C. M. A. P. (2023). Multidrug-resistant extended spectrum β -lactamase (ESBL)-producing *Escherichia coli* from farm produce and agricultural environments in Edo State, Nigeria. *PLOS ONE*, *18*(3), e0282835. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282835>
13. Mu, M., Liu, S., DeFlorio, W., Hao, L., Wang, X., Salazar, K. S., Taylor, M., Castillo, A., Cisneros-Zevallos, L., Oh, J. K., Min, Y., & Akbulut, M. (2023). Influence of surface roughness, nanostructure, and wetting on



- bacterial adhesion. *Langmuir*, 39(15), 5426–5439. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00091>
14. Nasrollahian, S., Graham, J. P., & Halaji, M. (2024). A review of the mechanisms that confer antibiotic resistance in pathotypes of *E. coli*. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1387497>
 15. Oh, J. K., Yegin, Y., Yang, F., Zhang, M., Li, J., Huang, S., Verkhoturov, S. V., Schweikert, E. A., Perez-Lewis, K., Scholar, E. A., Taylor, T. M., Castillo, A., Cisneros-Zevallos, L., Min, Y., & Akbulut, M. (2018). The influence of surface chemistry on the kinetics and thermodynamics of bacterial adhesion. *Scientific Reports*, 8(1), 17247. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35343-1>
 16. Omotosho, A. O., Ibrahim, U. F., Oloninefa, S. D., Mohammed, S. S., & Ndanusa, A. H. (2024). Isolation and identification of bacteria associated with the spoilage of *Cucumis melo* (Golden melon) Sold in Zuba and Gwarimpa Market. *Asian Journal of Microbiology and Biotechnology*, 9(2), 165–173. <https://doi.org/10.56557/ajmab/2024/v9i29011>
 17. Sadeghzadeh, R., Esfandiari, Z., Khaneghah, A. M., & Rostami, M. (2024). A review of challenges and solutions of biofilm formation of *Escherichia coli*: Conventional and Novel Methods of Prevention and Control. *Food and Bioprocess Technology*, 17(9), 2583–2618. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03288-7>
 18. Yuan, Y., Hays, M. P., Hardwidge, P. R., & Kim, J. (2017). Surface characteristics influencing bacterial adhesion to polymeric substrates. *RSC Advances*, 7(23), 14254–14261. <https://doi.org/10.1039/C7RA01571B>

