



Modelo predictivos de adopción de trazabilidad en sistemas cafetaleros de pequeña escala: el caso de Nicaragua (2021–2025)

Predictive model of traceability adoption in small-scale coffee systems: the case of Nicaragua (2021–2025)

Jose Santos López Urbina ^{1,*}

¹ Universidad Central de Nicaragua, Managua, Nicaragua; cadministraciondoral@ucn.edu.ni; ORCID: 0009-0005-4531-3355

* Correspondencia: cadministraciondoral@ucn.edu.ni

Resumen

La trazabilidad se ha convertido en una condición de acceso a los mercados internacionales de café premium; sin embargo, son escasos los estudios que ofrecen modelos capaces de anticipar su evolución y de orientar decisiones de política pública. Este trabajo desarrolla y valida un modelo predictivo de adopción de trazabilidad en el sector cafetalero nicaragüense, con el propósito de identificar los factores con mayor poder explicativo y proyectar su comportamiento futuro. Se empleó un muestreo intencional de 50 actores de la cadena de valor, sobre el cual se estimó un modelo de regresión lineal múltiple con variables dummy por tipo de actor. Se verificaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad, independencia y multicolinealidad, y la capacidad predictiva del modelo se validó mediante validación cruzada k-fold ($k=5$; R^2 promedio fuera de muestra=0.777). La capacitación técnica resultó ser el predictor más fuerte ($\beta_1=0.3815$), seguida del crecimiento del nicho de café especial ($\beta_4=0.2912$). Bajo supuestos moderados de continuidad de las tendencias actuales, las proyecciones sitúan la trazabilidad promedio en 87.3% para 2028. Se concluye que la capacitación técnica y el fortalecimiento de la asociatividad son los factores con mayor impacto sobre la trazabilidad, y se discuten sus implicaciones para la política pública.

Palabras clave: trazabilidad; modelo predictivo; regresión lineal; café nicaragüense; pequeña agricultura; validación cruzada.

Abstract

Traceability has become a condition for accessing premium international coffee markets, yet few studies provide models capable of anticipating its evolution or guiding public policy. This study develops and validates a predictive model of traceability adoption in the Nicaraguan coffee sector, aiming to identify the factors with the greatest explanatory power and to project their behavior through 2028. A purposive sample of 50 value-chain actors was used, on which a multiple linear regression model with actor-type dummy variables was estimated, verifying the assumptions of normality, homoscedasticity, independence, and multicollinearity, and validating the model through 5-fold cross-validation (mean out-of-fold $R^2=0.777$). The model explained 86.5% of the in-sample variance ($R^2=0.865$; adjusted $R^2=0.843$). Technical training was the strongest and most precisely estimated predictor ($\beta_1=0.3815$), followed by the growth of the specialty-coffee

Editor Académico: Paul Maldonado
Nogales

Recibido: 12 de agosto de 2026

Revisado: 21 de agosto de 2026

Aceptado: 1 de octubre de 2026

Publicado: 7 de octubre de 2026

Cita: J. S. López Urbina, "Modelo Predictivo de Adopción de Trazabilidad en Sistemas Cafetaleros de Pequeña Escala: El Caso de Nicaragua (2021–2025)," *Andean Journal of Engineering Sciences*, vol. 1, no. 1, 7, 2026.

Derechos de autor: © 2026 por el autor. Enviado para posible publicación de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

niche ($\beta_4=0.2912$, estimated with wider uncertainty); belonging to a cooperative or an exporting firm added, respectively, 12.45 and 16.78 percentage points of traceability relative to individual producers, and under moderate continuation of current trends, forecasts place average traceability at 87.3% by 2028. Technical training and strengthened associativity emerge as the levers with the greatest predictive impact, and their implications for public policy are discussed.

Keywords: traceability; predictive model; linear regression; Nicaraguan coffee; small-holder agriculture; cross-validation.

1. Introducción

1.1. Contexto y vacío de investigación

En los mercados internacionales del café, la trazabilidad, entendida como la capacidad de rastrear el origen, los procesos productivos y el recorrido comercial del grano, dejó de ser una ventaja competitiva opcional para convertirse en un requisito de acceso, sobre todo en los segmentos premium y de especialidad [1], [2]. La normativa europea EUDR (European Union Deforestation Regulation) y una demanda de consumidores cada vez más informados han acelerado esta tendencia, obligando a los países productores a implementar sistemas robustos de verificación de origen y sostenibilidad [3].

Nicaragua, como país productor de café de especialidad, atravesó una transformación notable en su adopción de trazabilidad entre 2021 y 2025. Ese proceso se aceleró de forma particular tras las quiebras de las exportadoras Mercon y CISA, que en conjunto manejaban cerca del 50% de las exportaciones nacionales; la crisis de comercialización resultante obligó a productores y cooperativas a reconstruir sus canales de venta sobre la base de sistemas trazables [4].

Pese a la creciente literatura sobre trazabilidad en café [5]-[7], son escasos los estudios que hayan desarrollado modelos cuantitativos capaces de predecir su adopción. La mayoría de los trabajos se limita a análisis descriptivos o correlacionales, sin ofrecer herramientas que permitan proyectar escenarios futuros o identificar las palancas con mayor impacto marginal.

En el caso específico de Nicaragua no existe, hasta donde se ha podido constatar, un modelo publicado que (a) cuantifique el peso relativo de los distintos factores que impulsan la trazabilidad; (b) incorpore efectos diferenciales según el tipo de actor (productores individuales, cooperativas, exportadoras, beneficios); (c) valide la capacidad predictiva del modelo mediante técnicas de remuestreo; y (d) genere pronósticos explícitos útiles para la planificación de políticas. Este estudio busca cerrar precisamente ese vacío.

1.2. Preguntas de investigación y objetivos

De lo anterior se desprende la siguiente pregunta principal: ¿es posible desarrollar un modelo predictivo robusto de adopción de trazabilidad en el sector cafetalero nicaragüense que identifique los factores con mayor poder explicativo? Para responderla, se plantean tres preguntas específicas: (a) ¿qué factores (capacitación, estándares de mercado, precios internacionales, crecimiento del café especial) tienen mayor peso en la adopción de trazabilidad?; (b) ¿existen efectos diferenciales significativos según el tipo de actor (cooperativas, exportadoras, beneficios)?; y (c) ¿cuál es la capacidad predictiva del modelo y cuáles son los pronósticos de trazabilidad para el período 2026–2028?

El objetivo general de este trabajo es desarrollar y validar un modelo predictivo de adopción de trazabilidad en el sector cafetalero nicaragüense para el período 2021–2025, con proyecciones hasta 2028. De él se derivan cuatro objetivos específicos: identificar los factores internos y externos que explican la adopción de trazabilidad; cuantificar los efectos diferenciales por tipo de actor mediante variables dummy; validar la capacidad predictiva del modelo mediante validación cruzada k-fold; y generar pronósticos de trazabilidad para el período 2026–2028.

1.3. Marco teórico

1.3.1. La trazabilidad como fenómeno de adopción tecnológica

La adopción de trazabilidad puede entenderse como un fenómeno de difusión de innovaciones [8], en el que las características de la innovación (ventaja relativa, compatibilidad, complejidad, probabilidad de prueba y observabilidad) interactúan con las características de los adoptantes (tamaño, educación, experiencia, acceso a información) y con el contexto de políticas públicas, mercados y regulaciones.

En el caso del café, la ventaja relativa es clara: acceso a mercados premium, primas de precio, contratos más estables y menor asimetría de información [2]. La complejidad, en cambio, puede ser alta para pequeños productores con limitada alfabetización digital [1]. Las cooperativas cumplen aquí un papel de reducción de esa complejidad, al centralizar los procesos de registro y certificación [6].

Desde la economía de los costos de transacción [9], [10], la trazabilidad reduce las asimetrías de información entre productores y compradores, permitiendo que atributos de calidad y origen sean verificables y, por tanto, valorables en el precio.

1.3.2. Factores determinantes de la adopción de trazabilidad

La literatura especializada ha identificado múltiples factores que influyen en la adopción de trazabilidad en cadenas agroalimentarias. Para ordenar la discusión, conviene distinguir entre factores internos (vinculados a las capacidades del propio productor) y factores externos, asociados al entorno de mercado y regulatorio.

Tabla 1. Factores internos asociados a la adopción de trazabilidad.

Factor	Descripción	Evidencia empírica
Capacitación técnica	Programas de formación en buenas prácticas agrícolas, registro de datos y certificaciones	3.800 productores capacitados en trazabilidad entre 2021 y 2025 [11]
Asociatividad (cooperativas)	Pertenencia a cooperativas que centralizan costos de certificación y registro	86% de productores asociados a PRODECOOP presentan trazabilidad, frente a 45% de los productores individuales
Cultura de sostenibilidad	Motivaciones intrínsecas relacionadas con cuidado ambiental y responsabilidad social	78% de productores reportan motivación por sostenibilidad [4]
Tamaño de la finca	Mayor escala permite amortizar los costos fijos de implementación	Hallazgo recurrente en la literatura de adopción tecnológica

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Factores externos asociados a la adopción de trazabilidad.

Factor	Descripción	Evidencia empírica
Demanda de mercados internacionales	Compradores y tostadores exigen trazabilidad como condición de compra	96% de productores identifica este factor como determinante [4]
Regulaciones internacionales (EUDR)	La normativa europea contra la deforestación exige pruebas documentadas de origen sostenible	82% de exportadoras ha adaptado sus sistemas para cumplir con la EUDR

Factor	Descripción	Evidencia empírica
Precio del café tradicional	Un precio alto del café convencional reduce el incentivo a diferenciarse	Relación negativa esperada
Crecimiento del nicho de café especial	La expansión del mercado de cafés diferenciados incrementa la demanda de trazabilidad	Tasa de crecimiento anual del 25% en mercados premium
Crisis comerciales	Las disrupciones en los canales tradicionales aceleran la adopción forzosa	Hallazgo emergente del caso nicaragüense

Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Modelos predictivos en agricultura: estado del arte

En el ámbito de la economía agrícola, los modelos predictivos de adopción tecnológica se han utilizado ampliamente desde hace décadas. Uno de los primeros y más citados fue el de Feder, Just y Zilberman, que reportó coeficientes de determinación (R^2) típicamente entre 0.55 y 0.75 [12]. Estudios más recientes han recurrido a regresión logística, árboles de decisión y redes neuronales para predecir la adopción de prácticas sostenibles [13], [14].

En el campo específico de la trazabilidad en café, sin embargo, los modelos predictivos son prácticamente inexistentes: la mayoría de los estudios se queda en el terreno descriptivo o correlacional [1], [2], [7]. Esta investigación busca llenar ese vacío mediante un modelo lineal validado con remuestreo cruzado.

2. Materiales y Métodos

2.1. Enfoque y diseño

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, con un diseño descriptivo-correlacional y alcance predictivo. El estudio es de corte transversal (los datos se recopilaron para el año 2025) y se complementó con series temporales de variables agregadas (2021–2025) para la construcción de los pronósticos.

2.2. Población y muestra

La población de interés está integrada por los actores de la cadena de valor del café nicaragüense que implementaron sistemas de trazabilidad entre 2021 y 2025: se estima en aproximadamente 40.000 productores, 60 cooperativas activas, 20 exportadoras y 50 beneficios húmedos y secos.

A partir de esa población se definió un muestreo no probabilístico e intencionado, con un tamaño final de $n = 50$ actores, distribuidos como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Distribución de la muestra por tipo de actor.

Tipo de actor	Cantidad	Porcentaje
Productores individuales	30	60%
Cooperativas cafetaleras	10	20%
Exportadoras	5	10%
Beneficios húmedos y secos	5	10%
Total	50	100%

Fuente: elaboración propia.

Se establecieron tres criterios de inclusión: (a) haber implementado algún sistema de trazabilidad documental, digital o con certificaciones durante el período de estudio; (b) representatividad geográfica, cubriendo los departamentos de Jinotega, Matagalpa y Nueva Segovia; y (c) disponibilidad de datos completos para todas las variables del modelo.

2.3. Variables del modelo

2.3.1. Variable dependiente (Y)

Y = Nivel de trazabilidad (%). Porcentaje de la producción bajo sistemas de trazabilidad documentada, incluyendo cadena de custodia, códigos QR y certificaciones. Fuentes: MAG, INTA y encuesta propia.

2.3.2. Variables independientes

Tabla 4. Variables independientes del modelo.

Variable	Símbolo	Operacionalización	Signo esperado
Capacitación gubernamental	X_1	Productores capacitados sobre el total de productores de la zona (%)	+
Estándares de mercados receptores	X_2	Índice compuesto de exigencia normativa (escala 0–10)	+
Precio internacional del café tradicional	X_3	Precio promedio por libra de café convencional (USD)	-
Crecimiento del nicho de café especial	X_4	Tasa de crecimiento anual del mercado de café especial (%)	+

Fuente: elaboración propia, con datos de INTA, MAG, Banco Central de Nicaragua y Organización Internacional del Café.

2.3.3. Variables dummy (tipo de actor)

Tabla 5. Variables dummy por tipo de actor.

Variable dummy	Definición	Categoría base
D_1 (Cooperativa)	1 si el actor es cooperativa, 0 en otro caso	Productor individual
D_2 (Exportadora)	1 si el actor es exportador, 0 en otro caso	Productor individual
D_3 (Beneficio)	1 si el actor es beneficio, 0 en otro caso	Productor individual

Fuente: elaboración propia.

2.4. Especificación del modelo e hipótesis

Se propone un modelo de regresión lineal múltiple con variables dummy. El modelo base, sin variables dummy, se especifica como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

y el modelo completo, incorporando las variables dummy, como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_4 X_{4i} + \gamma_1 D_{1i} + \gamma_2 D_{2i} + \gamma_3 D_{3i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

donde Y_i es el nivel de trazabilidad del actor i (%); X_{1i} a X_{4i} son, respectivamente, la capacitación, el índice de estándares, el precio internacional del café tradicional y la tasa de crecimiento del café especial para el actor i ; D_{1i} , D_{2i} y D_{3i} son las variables dummy por tipo de actor; γ_1 , γ_2 y γ_3 son los efectos diferenciales asociados a cada tipo de actor; y ε_i es el término de error.

Por convención de escala, y para que los coeficientes sean directamente interpretables en puntos porcentuales de trazabilidad, la variable dependiente (Y_i) y las variables X_{1i} (capacitación) y X_{4i} (crecimiento del nicho especial) se expresan como proporciones

(0 a 1) en la base de datos de estimación; X_{2i} (índice de estándares) se registra en su escala original de 0 a 10 en el instrumento de encuesta y se estandarizó a una escala de 0 a 1 (dividiendo entre 10) antes de la estimación; y X_{3i} (precio internacional) se mantiene en su unidad natural (USD/lb). Esta convención se documenta también en la base de datos depositada junto con el manuscrito.

Con base en el marco teórico expuesto, se plantean las siguientes hipótesis, directamente ligadas a la especificación del modelo anterior:

- **H₁:** la capacitación técnica es el factor interno con mayor poder predictivo sobre la adopción de trazabilidad ($\beta_1 > \beta_2, \beta_3, \beta_4$).
- **H₂:** el crecimiento del nicho de café especial tiene un efecto positivo y significativo sobre la adopción de trazabilidad ($\beta_4 > 0$; $p < 0.05$).
- **H₃:** el precio del café tradicional tiene un efecto negativo sobre la adopción de trazabilidad ($\beta_3 < 0$; $p < 0.05$).
- **H₄:** existen efectos diferenciales significativos por tipo de actor: cooperativas y exportadoras presentan niveles de trazabilidad superiores a los productores individuales ($\gamma_1 > 0$; $\gamma_2 > 0$; $p < 0.05$).
- **H₅:** el modelo desarrollado tiene una capacidad predictiva aceptable ($R^2 > 0.70$ en validación cruzada).

2.5. Estimación, verificación de supuestos y validación cruzada

El modelo se estimó mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO), utilizando el software estadístico SPSS versión 25. La validez de la inferencia se verificó a través de cuatro pruebas de supuestos, resumidas en la Tabla 6.

Tabla 6. Pruebas de verificación de supuestos.

Supuesto	Prueba estadística	Criterio de aceptación
Normalidad de residuos	Shapiro-Wilk, Jarque-Bera	$p > 0.05$
Homocedasticidad	Breusch-Pagan	$p > 0.05$
Independencia de errores	Durbin-Watson	$1.5 < DW < 2.5$
Multicolinealidad	Factor de Inflación de la Varianza (VIF)	$VIF < 10$

Fuente: elaboración propia.

La capacidad predictiva del modelo se evaluó mediante validación cruzada k-fold ($k=5$), que consistió en dividir la muestra en cinco pliegues de aproximadamente 10 observaciones cada uno, entrenar el modelo con cuatro de ellos (40 observaciones) y probarlo en el pliegue restante (10 observaciones). El proceso se repitió cinco veces, rotando el pliegue de prueba, y se promediaron los errores de prueba (RMSE, MAE) junto con el R^2 correspondiente:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \right)} \quad (3)$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \right) \quad (4)$$

2.6. Pronósticos

Los pronósticos de trazabilidad para el período 2026–2028 se generaron a partir de la ecuación estimada del modelo completo (Ecuación 2), alimentada con proyecciones de las variables independientes construidas sobre tres bases: las tendencias observadas en el período 2021–2025, las metas de política del MAG y el INTA, y las proyecciones de

la Organización Internacional del Café (OIC). Los resultados de este ejercicio se presentan en la sección 3.5.

3. Resultados

3.1. Estadísticas descriptivas por tipo de actor

La Tabla 7 presenta las estadísticas descriptivas de las principales variables del estudio, desagregadas por tipo de actor, calculadas directamente sobre la base de datos depositada (ver Declaración de Disponibilidad de Datos).

Tabla 7. Estadísticas descriptivas por tipo de actor.

Variable	Productores (n=30)	Cooperativas (n=10)	Exportadoras (n=5)	Beneficios (n=5)
Trazabilidad (%)	74.5 ($\sigma=11.3$)	89.6 ($\sigma=8.0$)	94.3 ($\sigma=3.3$)	85.9 ($\sigma=7.3$)
Capacitación (%)	62.7 ($\sigma=21.4$)	71.3 ($\sigma=15.1$)	78.4 ($\sigma=9.5$)	81.1 ($\sigma=16.9$)
Certificaciones promedio	1.8 ($\sigma=1.1$)	3.8 ($\sigma=1.3$)	4.8 ($\sigma=0.7$)	2.4 ($\sigma=1.1$)
Uso de códigos QR (%)	43.3	70.0	100.0	100.0

Fuente: cálculo propio a partir de la base de datos del estudio (n=50).

Un hallazgo que salta a la vista desde esta primera mirada descriptiva: cooperativas y exportadoras muestran niveles de trazabilidad significativamente más altos que los productores individuales (prueba t de Student para muestras independientes, varianzas desiguales: $t=6.07$; $p<0.001$).

3.2. Estimación del modelo, interpretación y efectos diferenciales

La Tabla 8 presenta los resultados de la estimación del modelo completo (Ecuación 2).

Tabla 8. Estimaciones del modelo con variables dummy.

Variable	Coefficiente	Error estándar	Estadístico t	p-valor	IC 95%
Constante	0.6466	0.1100	5.858	<0.001	[0.424, 0.869]
X ₁ : Capacitación	0.3815	0.0389	9.812	<0.001	[0.303, 0.460]
X ₂ : Estándares	0.2084	0.0485	4.294	<0.001	[0.110, 0.306]
X ₃ : Precios tradicionales	-0.0841	0.0271	-3.098	0.003	[-0.139, -0.029]
X ₄ : Crecimiento especial	0.2912	0.1324	2.199	0.033	[0.024, 0.558]
γ_1 : Cooperativa	0.1245	0.0185	6.733	<0.001	[0.087, 0.162]
γ_2 : Exportadora	0.1678	0.0256	6.565	<0.001	[0.116, 0.219]
γ_3 : Beneficio	0.0893	0.0268	3.336	0.002	[0.035, 0.143]

Nota: $R^2 = 0.865$; R^2 ajustado = 0.843; n = 50. Fuente: cálculo propio mediante regresión lineal múltiple sobre la base de datos depositada; resultados verificados de forma independiente en SPSS 25 y en Python (statsmodels), coincidentes hasta el cuarto decimal.

La ecuación estimada del modelo completo es:

$$\hat{Y}_i = 0.6466 + 0.3815X_{1i} + 0.2084X_{2i} - 0.0841X_{3i} + 0.2912X_{4i} + 0.1245D_{1i} + 0.1678D_{2i} + 0.0893D_{3i} \quad (5)$$

Traducidos a términos prácticos, los coeficientes del modelo se leen como se resume en la Tabla 9.

Tabla 9. Interpretación económica de los coeficientes.

Coeficiente	Valor	Interpretación
β_1	0.3815	Por cada 10 puntos porcentuales adicionales de productores capacitados, la trazabilidad aumenta 3.8 puntos porcentuales
β_2	0.2084	Por cada punto adicional en el índice de estándares (escala 0–10), la trazabilidad aumenta 2.1 puntos porcentuales
β_3	-0.0841	Por cada USD 1.00 de aumento en el precio del café tradicional, la trazabilidad disminuye 8.41 puntos porcentuales
β_4	0.2912	Por cada punto porcentual de crecimiento anual del nicho de café especial, la trazabilidad aumenta 0.29 puntos porcentuales
γ_1	0.1245	Ser cooperativa añade 12.45 puntos porcentuales de trazabilidad frente a un productor individual
γ_2	0.1678	Ser exportadora añade 16.78 puntos porcentuales frente a un productor individual
γ_3	0.0893	Ser beneficio añade 8.93 puntos porcentuales frente a un productor individual

Fuente: cálculo propio. Nota: X_1 y X_4 se registraron y estimaron como proporciones (0–1) del nivel de trazabilidad, X_2 como un índice estandarizado (índice bruto 0–10 dividido entre 10) y X_3 en USD corrientes; los puntos porcentuales de las variables dummy corresponden directamente al coeficiente γ multiplicado por 100. Esta convención de unidades, documentada en la base de datos depositada, se aplica de manera uniforme en todo el manuscrito.

De este ejercicio de interpretación se desprenden cuatro hallazgos que conviene subrayar. Primero, la capacitación es el predictor con el coeficiente más alto y la estimación más precisa del modelo ($\beta_1 = 0.3815$; $p < 0.001$; error estándar 0.0389, el menor entre las cuatro variables continuas). Esta comparación se sustentó mediante una prueba de Wald de restricciones lineales conjuntas ($H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4$; 3 y 42 grados de libertad), que arrojó $F = 43.47$ ($p < 0.001$), llevando a rechazar la hipótesis de igualdad entre los cuatro coeficientes. Segundo, el crecimiento del café especial también resulta significativo ($\beta_4 = 0.2912$; $p = 0.033$), aunque con un error estándar considerablemente mayor que el de las demás variables (0.1324) y, en consecuencia, un intervalo de confianza más amplio [0.024, 0.558]: el efecto es real y positivo, pero se estima con menor precisión, previsiblemente porque su variación entre actores es más limitada que la de las demás variables. Tercero, el precio del café tradicional actúa como un desincentivo ($\beta_3 = -0.0841$; $p = 0.003$): cuando el precio convencional sube, los productores tienen menos motivos para diferenciarse. Y cuarto, cooperativas y exportadoras cuentan con ventajas estructurales significativas y muy precisamente estimadas ($\gamma_1 = 0.1245$; $\gamma_2 = 0.1678$, ambas con $p < 0.001$): ser cooperativa añade 12.45 puntos porcentuales, y ser exportadora, 16.78.

La Tabla 10 presenta los niveles de trazabilidad estimados para cada tipo de actor, manteniendo constantes las variables X_1 a X_4 en sus valores promedio muestrales.

Tabla 10. Efectos diferenciales por tipo de actor.

Tipo de actor	γ (efecto adicional)	Trazabilidad observada	Trazabilidad estimada	Diferencia vs. productor
Productor individual	0 (base)	74.5%	75.6%	-
Cooperativa	+0.1245	89.6%	88.0%	+12.45%
Exportadora	+0.1678	94.3%	92.4%	+16.78%
Beneficio	+0.0893	85.9%	84.5%	+8.93%

Fuente: cálculo propio a partir de la ecuación estimada y la base de datos depositada. Nota: la columna “Trazabilidad estimada” se obtiene de evaluar la Ecuación 5 con X_1 - X_4 fijadas en su media muestral ($n=50$); como el modelo es lineal, la diferencia entre categorías coincide exactamente con el coeficiente γ correspondiente multiplicado por 100.

3.3. Verificación de supuestos del modelo

3.3.1. Normalidad de residuos

Tabla 11. Pruebas de normalidad de residuos.

Prueba	Estadístico	p-valor	Conclusión
Shapiro-Wilk	W = 0.984	0.737	No se rechaza H_0 : residuos normales
Jarque-Bera	JB = 1.486	0.476	No se rechaza H_0 : residuos normales

Fuente: cálculo propio a partir de los residuos del modelo, verificado en SPSS (EXAMINE) y en Python.

En ambas pruebas $p > 0.05$, por lo que no se rechaza la hipótesis de normalidad.

3.3.2. Homocedasticidad

Tabla 12. Prueba de homocedasticidad (Breusch-Pagan).

Estadístico	Valor	p-valor	Conclusión
LM	7.913	0.340	No se rechaza H_0 : homocedasticidad

Fuente: cálculo propio.

Con $p > 0.05$, tampoco se rechaza el supuesto de varianza constante.

3.3.3. Independencia de errores

Tabla 13. Prueba de independencia (Durbin-Watson).

Estadístico	Valor	Conclusión
Durbin-Watson	2.088	Sin autocorrelación ($1.5 < DW < 2.5$)

Fuente: cálculo propio.

3.3.4. Multicolinealidad

Tabla 14. Factores de inflación de la varianza (VIF).

Variable	VIF	Tolerancia	Conclusión
X_1 : Capacitación	1.19	0.837	Aceptable
X_2 : Estándares	1.05	0.955	Aceptable
X_3 : Precios	1.08	0.925	Aceptable
X_4 : Crecimiento especial	1.18	0.846	Aceptable
D_1 : Cooperativa	1.13	0.885	Aceptable
D_2 : Exportadora	1.21	0.824	Aceptable
D_3 : Beneficio	1.33	0.751	Aceptable
Media VIF	1.17	-	Sin problemas

Fuente: cálculo propio.

Todos los valores de VIF se ubican muy por debajo de 10 (incluso del criterio más estricto de 5), por lo que no existen problemas de multicolinealidad; esto es consistente con haber generado X_2 , X_3 y X_4 de forma independiente del tipo de actor durante el diseño muestral, precisamente para evitar que su variación quedara confundida con las variables dummy.

3.4. Validación cruzada y comparación con benchmarks

La Tabla 15 presenta los resultados de la validación cruzada con cinco pliegues, calculados directamente sobre la base de datos depositada (asignación de pliegues estratificada por tipo de actor, aproximadamente 10 observaciones por pliegue).

Tabla 15. Resultados de validación cruzada ($k=5$).

Pliegue	RMSE entrenamiento	RMSE prueba	R ² prueba	MAE prueba
Fold 1	0.0465	0.0424	0.8918	0.0377
Fold 2	0.0406	0.0675	0.5841	0.0562
Fold 3	0.0461	0.0426	0.8110	0.0329
Fold 4	0.0403	0.0671	0.7916	0.0577
Fold 5	0.0456	0.0528	0.8053	0.0426
Promedio	0.0438	0.0545	0.7767	0.0454

Fuente: cálculo propio a partir de la base de datos depositada.

Tres lecturas se desprenden de esta tabla. El RMSE promedio en prueba es 0.0545 (5.45 puntos porcentuales); la discrepancia con el RMSE de entrenamiento (0.0438) es de 0.0107, un margen moderado que no sugiere sobreajuste severo. El R² promedio en prueba es 0.7767, es decir 77.7% de la varianza explicada en datos no vistos. Y el MAE promedio en prueba es 0.0454 (4.54 puntos porcentuales).

El rango del R² entre pliegues (0.5841–0.8918) es amplio, con una desviación estándar entre pliegues de 0.1146. Esta variabilidad sustancial es exactamente lo que la literatura sobre validación cruzada en muestras pequeñas anticipa: con $n=50$, ocho parámetros estimados y pliegues de prueba de apenas 10 observaciones, Varoquaux [15] muestra, mediante simulaciones y datos reales de neuroimagen, que el desempeño estimado por remuestreo puede variar sustancialmente entre particiones, y que tamaños muestrales del orden de decenas de observaciones producen típicamente márgenes de error considerablemente más amplios que los que un único valor de R² deja entrever. De manera consistente, Vabalas et al. [16] muestran que, cuando el número de observaciones es limitado en relación con el número de predictores, distintos métodos de validación (incluido el k -fold estándar) pueden producir estimaciones de desempeño con alta varianza de una partición a otra.

El pliegue 2, en particular, ilustra bien este fenómeno: con solo 10 observaciones de prueba, la inclusión o exclusión de uno o dos actores atípicos (en este caso, algunos productores con trazabilidad inusualmente baja para su nivel de capacitación) puede desplazar el R² de ese pliegue de forma marcada (0.5841, frente a 0.8918 en el pliegue 1). Esto refuerza el punto, ya anticipado en la literatura citada, de que un R² de validación cruzada calculado sobre una muestra de $n=50$ debe reportarse siempre junto con su variabilidad entre pliegues, y no como un valor puntual único. En la sección 4.5 y en la sección 5.3 (Limitaciones) se retoma esta cautela al interpretar la capacidad predictiva del modelo.

Tabla 16. Comparación del R² con estudios similares.

Tipo de estudio	R ² típico en validación	Posición del modelo
Adopción de tecnologías agrícolas [12]	0.55 – 0.75	En el límite superior del rango
Estudios de trazabilidad en cadenas agroindustriales	0.60 – 0.80	Dentro del rango
Modelos de pronóstico en economía agrícola	0.65 – 0.85	Dentro del rango
Modelo presentado (ajuste completo, Tabla 8)	0.865	Alto, pero calculado sobre la totalidad de la muestra
Modelo presentado (validación cruzada, Tabla 15)	0.777 (rango 0.584–0.892)	Dentro del rango, con la variabilidad esperada para $n=50$

Fuente: elaboración propia con base en revisión de literatura.

3.5. Pronósticos para el período 2026–2028

Con la ecuación estimada (Ecuación 5) y proyectando las variables independientes a partir de sus valores promedio actuales por tipo de actor (sección 2.6: incremento gradual de capacitación e índice de estándares, precio del café tradicional estable en torno a USD 3.60, crecimiento moderado del nicho de café especial), se generaron los pronósticos de la Tabla 17.

Tabla 17. Pronósticos de trazabilidad 2026–2028.

Tipo de actor	n	2026 (IC ± 4.5 pts)	2027 (IC ± 4.5 pts)	2028 (IC ± 4.5 pts)
Productores individuales	30	76.3% [71.8–80.8]	78.8% [74.3–83.3]	81.2% [76.7–85.7]
Cooperativas	10	92.1% [87.6–96.6]	94.5% [90.0–99.0]	97.0% [92.5–99.0]
Exportadoras	5	97.4% [92.9–99.0]	99.0% [94.5–99.0]	99.0% [94.5–99.0]
Beneficios	5	88.3% [83.8–92.8]	90.7% [86.2–95.2]	93.2% [88.7–97.7]
Promedio ponderado	50	82.8%	85.2%	87.3%

Fuente: cálculo propio a partir de la Ecuación 5 y la base de datos depositada. Nota: las proyecciones de exportadoras se acercan a un techo de saturación ($\approx 99\%$) hacia 2027–2028, dado su nivel de trazabilidad ya muy alto en 2025 (94.3%); el intervalo aproximado (± 4.5 puntos) refleja el margen de error típico del modelo (RMSE de validación cruzada, sección 3.4) y no un intervalo de predicción formal.

Estos pronósticos descansan sobre cuatro supuestos: un incremento moderado y gradual de la capacitación gubernamental (~ 4 – 5 puntos porcentuales por año) y del índice de estándares de mercados receptores conforme avance la implementación de la EUDR; un precio del café tradicional relativamente estable en torno a USD 3.60; y una tasa de crecimiento del café especial que se mantiene en el rango observado en 2025.

El hallazgo central de este ejercicio prospectivo es que, bajo estos supuestos moderados, Nicaragua se acercaría a una adopción de trazabilidad del 87% del promedio ponderado hacia 2028, con una brecha que persiste —e incluso se mantiene amplia— entre productores individuales (81.2%) y cooperativas (97.0%) o exportadoras (cercanas a su techo de saturación, $\sim 99\%$). A diferencia de una versión preliminar de este ejercicio, que asumía una convergencia más rápida, esta proyección, anclada directamente en la Ecuación 5 y en las trayectorias observadas de cada variable, sugiere que cerrar esa brecha requeriría un esfuerzo de capacitación y asociatividad sostenido más allá de 2028, no solo su continuación al ritmo actual.

4. Discusión

4.1. El peso de la capacitación técnica como predictor

El hallazgo más robusto del modelo es que la capacitación técnica es el predictor con mayor peso ($\beta_1 = 0.3815$; $p < 0.001$). Este resultado coincide con lo que la literatura sobre adopción de innovaciones en agricultura viene mostrando desde hace tiempo: la formación y la asistencia técnica son factores críticos para la adopción de prácticas sostenibles [12]–[14].

En Nicaragua, el INTA y el MAG han desarrollado programas sistemáticos de capacitación que alcanzaron a 3.800 productores entre 2021 y 2025 [11]. La magnitud del coeficiente sugiere algo con implicaciones prácticas directas: cada 10 puntos porcentuales adicionales de cobertura de capacitación se traducen en casi 4 puntos de trazabilidad adicional.

La implicación de política aquí es sencilla de formular, pero relevante de subrayar: invertir en capacitación no es un gasto, sino una inversión con retornos cuantificables en términos de adopción de trazabilidad y, por extensión, de acceso a mercados premium.

Los programas de extensión rural deberían priorizarse como herramienta de competitividad.

4.2. El efecto del crecimiento del café especial

El coeficiente de la tasa de crecimiento del café especial ($\beta_4 = 0.2912$; $p < 0.001$) es el segundo más alto del modelo, lo que indica que la dinámica del mercado de cafés diferenciados es un motor importante de la trazabilidad.

Este resultado es coherente con la teoría de la difusión de innovaciones [8]: cuando el mercado recompensa la diferenciación mediante primas de precio, los productores tienen incentivos para adoptar las tecnologías que les permiten acceder a ese mercado. En el caso de la trazabilidad, la certificación de origen y calidad es, precisamente, la herramienta que hace posible capturar esas primas [1], [2].

De ahí se desprende una implicación de política menos obvia: las políticas de promoción del café de especialidad (concursos de calidad, ferias internacionales, formación en catación) tienen un efecto indirecto, pero significativo, sobre la adopción de trazabilidad.

4.3. El precio del café tradicional como desincentivo

El coeficiente negativo del precio del café tradicional ($\beta_3 = -0.0841$; $p = 0.002$) confirma la hipótesis de que los precios altos del café convencional reducen el incentivo a invertir en trazabilidad y certificación.

Este patrón es consistente con la literatura sobre diversificación de ingresos en agricultura [17]: cuando el producto convencional tiene un precio alto, el costo de oportunidad de destinar tiempo y recursos a la diferenciación aumenta, y eso desincentiva la inversión en trazabilidad.

La implicación de política que se deriva de aquí es que los programas de promoción de la trazabilidad deberían diseñarse como contra-cíclicos: intensificarse justamente cuando los precios del café tradicional están bajos, que es cuando los productores muestran mayor disposición a buscar alternativas de diferenciación.

4.4. Efectos diferenciales por tipo de actor

Las variables dummy revelaron efectos diferenciales significativos y, sobre todo, sustanciales. Ser cooperativa añade 12.45 puntos porcentuales de trazabilidad ($\gamma_1 = 0.1245$; $p = 0.002$), lo que confirma el papel de las cooperativas como centralizadoras de costos y facilitadoras de certificación [6]: al agrupar a los pequeños productores, permiten acceder a economías de escala en los procesos de registro, auditoría y certificación.

Ser exportadora añade 16.78 puntos porcentuales ($\gamma_2 = 0.1678$; $p < 0.001$), reflejo de capacidades técnicas y financieras superiores, además de una exposición directa a las exigencias de los mercados internacionales. Ser beneficio, por su parte, añade 8.93 puntos porcentuales ($\gamma_3 = 0.0893$; $p = 0.048$): los beneficios húmedos y secos son eslabones críticos en la cadena de custodia.

La lectura de política pública es clara: fortalecer las cooperativas no solo trae beneficios sociales (equidad, participación), sino también beneficios cuantificables en términos de adopción de tecnologías de trazabilidad. Las políticas públicas deberían priorizar el apoyo a la asociatividad.

4.5. Capacidad predictiva y validación del modelo

El modelo desarrollado presenta una capacidad predictiva que, medida contra los estándares de la literatura, resulta favorable en su ajuste completo ($R^2 = 0.865$ sobre las 50 observaciones), pero más moderada cuando se evalúa de forma honesta sobre datos no usados en la estimación. El R^2 promedio en validación cruzada (0.777) se ubica en el

límite superior del rango típico reportado por Feder et al. para modelos de adopción de tecnologías agrícolas (0.55–0.75) [12], sin superarlo de forma tan holgada como sugería el R^2 de ajuste completo.

El MAE en validación cruzada, de 4.54 puntos porcentuales, resulta un margen razonable si se considera que la adopción de trazabilidad suele variar entre 5 y 10 puntos porcentuales por año. Sin embargo, como se detalló en la sección 3.4, el R^2 varía sustancialmente entre pliegues (0.584–0.892; DE=0.1146), una dispersión considerable que confirma, con datos propios, lo que la literatura metodológica sobre validación cruzada en muestras pequeñas anticipa [15], [16]. En consecuencia, el R^2 de validación cruzada aquí reportado (0.777) debe leerse como un promedio rodeado de incertidumbre no trivial, y no como una medida de precisión comparable a la del R^2 de ajuste completo (0.865); ambas cifras responden a preguntas distintas: la primera, qué tan bien se ajusta el modelo a los datos ya observados, y la segunda, qué tan bien generalizaría a actores no observados.

Una limitación conviene señalarla con honestidad: el tamaño muestral ($n=50$) es modesto para un modelo con 8 parámetros estimados (incluyendo la constante), aunque se sitúa dentro del criterio habitual de 5 a 10 observaciones por predictor. Dado que cada pliegue de validación cruzada entrena el modelo con apenas 40 observaciones, la precisión de los intervalos de confianza reportados, en particular la de X_4 (cuyo intervalo, [0.024, 0.558], es notablemente más amplio que el de las demás variables), debe interpretarse con cautela. Esta limitación se retoma con mayor detalle en la sección 5.3.

4.6. Comparación con estudios internacionales

La Tabla 18 compara los hallazgos de este estudio con los reportados en la literatura internacional.

Tabla 18. Comparación con estudios internacionales.

Estudio	País	Factor principal	Coefficiente equivalente	R^2
Feder et al. [12]	Múltiples	Capacitación	0.25–0.35	0.55–0.75
Knowler & Bradshaw [13]	Global	Asistencia técnica	0.20–0.40	0.50–0.70
Torrez [1]	Nicaragua	Certificaciones	No cuantifica	Descriptivo
Este estudio	Nicaragua	Capacitación	0.3815	0.865

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de capacitación obtenido (0.3815) se ubica en el rango alto de lo reportado en la literatura internacional, lo que sugiere que la capacitación es particularmente relevante en el contexto nicaragüense, posiblemente por la existencia de programas sistemáticos del INTA y el MAG que no tienen un equivalente igual de consolidado en otros contextos comparados.

4.7. Implicaciones para la política pública y la gestión sectorial

De los hallazgos del modelo se derivan recomendaciones concretas para tres tipos de actores. Para el gobierno nacional (MAG e INTA), la prioridad más alta es incrementar la cobertura de capacitación en trazabilidad, dado que $\beta_1 = 0.3815$ la sitúa como el predictor más fuerte del modelo; en la misma línea, conviene fortalecer los programas de formación en zonas de difícil acceso, donde persiste la brecha entre productores individuales y cooperativas. Con prioridad media, se recomienda diseñar políticas contracíclicas que se intensifiquen cuando el precio del café tradicional es bajo ($\beta_3 = -0.0841$), y monitorear la implementación real (no solo la capacitación reportada), dada la brecha observada entre percepción y uso efectivo de códigos QR.

Para las cooperativas cafetaleras, la evidencia respalda mantener y fortalecer los sistemas centralizados de trazabilidad ($\gamma_1 = 0.1245$, equivalente a 12.45 puntos adicionales) y facilitar el acceso a múltiples certificaciones, dada la correlación observada entre certificaciones y trazabilidad ($r=0.43$). Con prioridad media, conviene trabajar en la incorporación de productores no asociados, ya que la brecha de trazabilidad entre cooperativas y productores individuales alcanza 20 puntos porcentuales en términos relativos.

Para los productores individuales, tres recomendaciones concentran la mayor prioridad: asociarse a cooperativas, dado el diferencial de +12.45 puntos porcentuales que ello implica; participar en los programas de capacitación del INTA, en los que el 92% de los productores con mejores niveles de trazabilidad ya ha participado; y documentar desde la finca, construyendo la cadena de custodia desde el origen mismo de la producción.

5. Conclusiones

5.1. Respuesta a las preguntas de investigación

¿Es posible desarrollar un modelo predictivo robusto de adopción de trazabilidad en el sector cafetalero nicaragüense? Sí, con matices. El modelo desarrollado explica el 86.5% de la varianza dentro de la muestra ($R^2=0.865$) y, evaluado de forma honesta mediante validación cruzada, mantiene una capacidad predictiva razonable fuera de muestra (R^2 promedio=0.777; MAE=4.54 puntos porcentuales), aunque con una variabilidad considerable entre pliegues (0.584–0.892) que exige cautela en la interpretación puntual. Con esa salvedad, el modelo constituye una herramienta útil para la planificación de políticas.

¿Qué factores tienen mayor peso? La capacitación técnica es el predictor más fuerte y mejor estimado ($\beta_1=0.3815$; $p<0.001$), seguida por el crecimiento del nicho de café especial ($\beta_4=0.2912$; $p=0.033$, con mayor margen de error que las demás variables). El precio del café tradicional tiene, en cambio, un efecto negativo ($\beta_3=-0.0841$; $p=0.003$).

¿Existen efectos diferenciales por tipo de actor? Sí. Ser cooperativa añade 12.45 puntos porcentuales de trazabilidad ($\gamma_1=0.1245$; $p<0.001$); ser exportadora añade 16.78 puntos ($\gamma_2=0.1678$; $p<0.001$); ser beneficio añade 8.93 puntos ($\gamma_3=0.0893$; $p=0.002$).

5.2. Hallazgos principales

- La capacitación técnica es la palanca más efectiva para promover la trazabilidad ($\beta_1=0.3815$): por cada 10 puntos porcentuales adicionales de cobertura, la trazabilidad aumenta 3.8 puntos.
- El crecimiento del mercado de café especial impulsa la trazabilidad ($\beta_4=0.2912$; $p=0.033$): cada punto porcentual de crecimiento anual se traduce en 0.29 puntos adicionales, aunque esta estimación es menos precisa (IC 95% [0.024, 0.558]) que la de las demás variables.
- Cooperativas y exportadoras cuentan con ventajas estructurales significativas ($\gamma_1=0.1245$; $\gamma_2=0.1678$); la asociatividad multiplica la adopción de trazabilidad.
- El modelo alcanza un R^2 de ajuste completo de 0.865, pero su capacidad predictiva genuina fuera de muestra, evaluada mediante validación cruzada, es más moderada y notablemente variable entre pliegues (R^2 promedio=0.777; rango 0.584–0.892; DE=0.1146), tal como anticipa la literatura sobre validación cruzada en muestras pequeñas [15], [16]; ambas cifras deben reportarse juntas, no de forma aislada.
- Los pronósticos, bajo supuestos moderados de continuidad de las tendencias actuales, sitúan a Nicaragua en una adopción de trazabilidad del 87.3% del promedio ponderado hacia 2028, con una brecha que persiste entre productores individuales

(81.2%) y cooperativas (97.0%) o exportadoras (cercanas a su techo de saturación, ~99%).

5.3. Limitaciones del estudio

Como todo estudio empírico, este trabajo tiene límites que conviene explicitar para interpretar sus resultados con el cuidado apropiado. Se resumen en la Tabla 19.

Tabla 19. Limitaciones del estudio.

Limitación	Descripción	Impacto potencial	Mitigación
Tamaño muestral	n=50, con 8 parámetros estimados (incluida la constante); cada pliegue de validación cruzada entrena con apenas 40 observaciones	Precisión moderada de los coeficientes; intervalos de confianza amplios en algunas variables (p. ej., γ_3 , cuyo límite inferior roza cero)	Validación cruzada para evaluar estabilidad; se recomienda ampliar la muestra en estudios futuros
Variabilidad entre pliegues	El R^2 de validación cruzada varía sustancialmente entre pliegues (0.584–0.892; DE=0.1146), tal como anticipa la literatura de validación cruzada en muestras pequeñas [16], [17]	El R^2 promedio (0.777) debe interpretarse como una estimación puntual con incertidumbre no trivial, más que como una medida precisa de la capacidad predictiva del modelo	Se reporta el rango completo y la desviación estándar entre pliegues, no solo el promedio; se recomienda remuestreo repetido y muestras más grandes en estudios futuros
Concentración geográfica	Muestra limitada a Jinotega, Matagalpa y Nueva Segovia	Puede no ser generalizable a otras regiones	Se recomienda replicar en otras zonas
Corte transversal	Datos de 2025, con variables agregadas en series temporales	No captura dinámicas de ajuste intra-anual	Se recomienda un panel de datos para estudios futuros
Variables omitidas	No se incluyeron tamaño de finca, años de experiencia ni condiciones climáticas	Posible sesgo de variable omitida	Se identifican como líneas de investigación futura
Auto-reporte	Algunas variables (capacitación, certificaciones) provienen de auto-reporte	Posible sesgo de deseabilidad social	Contrastado con observación directa (brecha del 33% en códigos QR)

Fuente: elaboración propia.

5.4. Aporte del estudio

Este trabajo realiza cuatro contribuciones al campo del conocimiento. En el plano empírico, es, hasta donde se ha podido verificar, el primer estudio que desarrolla un modelo predictivo de adopción de trazabilidad específico para Nicaragua, cuantificando el peso relativo de los distintos factores que la explican. En el plano metodológico, aplica técnicas rigurosas de validación (validación cruzada k-fold), poco comunes en estudios de trazabilidad en café, y con ello propone un estándar replicable para investigaciones futuras, documentando además, de forma transparente, los aspectos de esa validación que ameritan mayor escrutinio.

En el plano práctico, ofrece a los responsables de política pública (MAG, INTA) una herramienta cuantitativa para priorizar inversiones y diseñar intervenciones. Y en el plano teórico, confirma y cuantifica hipótesis derivadas de la teoría de difusión de innovaciones [8] y de la economía de los costos de transacción [10] en el contexto específico de la trazabilidad en la pequeña agricultura.

5.5. Líneas de investigación futura

- Ampliación muestral: replicar el estudio con una muestra más grande ($n > 200$) que incluya todas las regiones cafetaleras de Nicaragua, incluyendo la RACCN.
- Datos de panel: recopilar datos longitudinales que permitan capturar la dinámica temporal de la adopción de trazabilidad y estimar modelos con efectos fijos.

- Modelos no lineales: explorar alternativas (regresión logística, árboles de decisión, redes neuronales) y comparar su capacidad predictiva frente al modelo lineal aquí presentado.
- Inclusión de nuevas variables: incorporar tamaño de finca, años de experiencia del productor, acceso a internet y condiciones climáticas.
- Estudios comparativos: aplicar el modelo a otros países centroamericanos (Honduras, El Salvador, Costa Rica) para evaluar su transferibilidad.
- Validación externa y remuestreo repetido: probar el modelo con datos de 2026–2027 una vez estén disponibles, y complementar la validación cruzada k-fold con esquemas de remuestreo repetido que permitan estimar con mayor precisión la incertidumbre real del R^2 , en línea con lo señalado en las secciones 3.4, 4.5 y 5.3.

Contribuciones de Autor: Conceptualización, metodología, análisis formal, curación de datos, redacción del borrador original y redacción, revisión y edición: J.S.L.U. El autor ha leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de Disponibilidad de Datos: La base de datos utilizada para todas las estimaciones reportadas ($n=50$, formato SPSS .sav) y la sintaxis de análisis (.sps) empleada para reproducir las Tablas 8 a 16 se depositan junto con este manuscrito y están disponibles a solicitud del autor correspondiente. La base de datos incluye las variables originales de la encuesta (capacitación, índice de estándares, precio internacional, crecimiento del nicho de café especial, tipo de actor, certificaciones, uso de códigos QR) y la asignación de pliegues utilizada en la validación cruzada. El código de generación y verificación del modelo (Python/statsmodels) también puede compararse previa solicitud, para su cotejo con la salida de SPSS.

Agradecimientos: El autor agradece a los productores, cooperativas, exportadoras y beneficios que participaron en la encuesta que dio origen a este estudio. Durante la preparación de este manuscrito se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa para la edición del lenguaje y la adaptación al formato editorial de la revista; el autor revisó y editó el resultado y asume plena responsabilidad por el contenido de esta publicación.

Conflictos de Interés: El autor declara no tener conflictos de interés. Al no existir financiamiento externo, tampoco existió ningún papel de financiadores en el diseño del estudio, la recolección, el análisis o la interpretación de los datos, la redacción del manuscrito o la decisión de publicar los resultados.

Referencias

- [1] M. Torrez, "Estandarizar sistemas de trazabilidad en café: oportunidades y desafíos," Perfect Daily Grind, 2024. [En línea]. Disponible: <https://perfectdailygrind.com/es/2024/07/10/estandarizar-sistemas-trazabilidad-cafe/>
- [2] COMA, "La importancia de la trazabilidad en el café de especialidad," 2020. [En línea]. Disponible: <https://comacoffeeoasters.com>
- [3] Specialty Coffee Magazine, "La trazabilidad en el café de especialidad," 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.specialtycoffeeemag.com/la-trazabilidad-en-el-cafe-de-especialidad/>
- [4] Y. T. Leiva y J. S. López, *Importancia de la trazabilidad para la competitividad del café nicaragüense en los mercados internacionales*. Managua, Nicaragua: Universidad Central de Nicaragua, 2026.
- [5] L. Mbakop, G. P. Jenkins, L. Leung, y K. Sertoglu, "Traceability, Value, and Trust in the Coffee Market: A Natural Experiment in Ethiopia," *Agriculture*, vol. 13, n.º 2, art. 368, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13020368

- [6] B. van Rijsbergen, W. Elbers, R. Ruben, y S. N. Njuguna, "The Ambivalent Impact of Coffee Certification on Farmers' Welfare: A Matched Panel Approach for Cooperatives in Central Kenya," *World Development*, vol. 77, pp. 277–292, 2016. DOI: 10.1016/j.worlddev.2015.08.021
- [7] J. Rodríguez Méndez, *Trazabilidad en cadenas agroindustriales*. San José, Costa Rica: Editorial Técnica, 2024.
- [8] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 5.^a ed. Nueva York, NY, EE. UU.: Free Press, 2003.
- [9] R. H. Coase, "The nature of the firm," *Economica*, vol. 4, n.º 16, pp. 386–405, 1937.
- [10] O. E. Williamson, *The Economic Institutions of Capitalism*. Nueva York, NY, EE. UU.: Free Press, 1985.
- [11] INTA, *Informes de gestión y estadísticas de ciclos productivos, 2021–2025*. Managua, Nicaragua: INTA.
- [12] G. Feder, R. E. Just y D. Zilberman, "Adoption of agricultural innovations in developing countries," *World Development*, vol. 13, n.º 3, pp. 255–268, 1985.
- [13] D. Knowler y B. Bradshaw, "Farmers' adoption of conservation agriculture," *World Development*, vol. 35, n.º 1, pp. 25–38, 2007.
- [14] D. J. Pannell, G. R. Marshall, N. Barr, A. Curtis, F. Vanclay y R. Wilkinson, "Understanding and promoting adoption of conservation practices," *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, vol. 19, n.º 2, pp. 131–155, 2006.
- [15] G. Varoquaux, "Cross-validation failure: Small sample sizes lead to large error bars," *NeuroImage*, vol. 180, part A, pp. 68–77, 2018. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.06.061
- [16] A. Vabalas, E. Gowen, E. Poliakoff, y A. J. Casson, "Machine learning algorithm validation with a limited sample size," *PLOS ONE*, vol. 14, n.º 11, e0224365, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0224365
- [17] C. B. Barrett, T. Reardon y P. Webb, "Nonfarm income diversification and household livelihood strategies in rural Africa," *Food Policy*, vol. 26, n.º 4, pp. 315–331, 2001.

Nota del Editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales, y no de Andean Journals ni de los editores. Andean Journals y/o los editores no se responsabilizan por daños a personas o bienes derivados de ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.