Ciencia y Educación
(L-ISSN: 2790-8402 E-ISSN: 2707-3378)
Vol. 7 No. 12.1
Edición Especial XII 2026

INTERNET DE LAS COSAS EN LA CADENA DEL CACAO: AGUA, MICROCLIMA Y MADUREZ TECNOLÓGICA. REVISIÓN SISTEMÁTICA

INTERNET OF THINGS IN THE COCOA CHAIN: WATER, MICROCLIMATE AND TECHNOLOGY READINESS. A SYSTEMATIC REVIEW

Autores: [1]Luis Cristóbal Córdova Martínez, [2]Daniel Alexander Vera Paredes, [3]Roberto Andres Chuquiana Tapia y [4]Johnny Roddy Lopez Briones.

[1]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3605-429X
[2]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-9033-3399
[3]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-7273-4467
[4]ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6491-8430
[1]E-mail de contacto: lcordovam@unemi.edu.ec
[2]E-mail de contacto: dverap@unemi.edu.ec
[3]E-mail de contacto: rchuquianat@unemi.edu.ec
[4]E-mail de contacto: jlopezb@unemi.edu.ec
Afiliación: [1*2*3*4]Universidad Estatal de Milagro, (Ecuador).
Artículo recibido: 7 de Noviembre del 2026.
Artículo revisado: 9 de Noviembre del 2026.
Artículo aprobado: 9 de Noviembre del 2026.
[1]Licenciado en Sistemas de Información adquirida, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (Ecuador). Magíster en Gerencia de Tecnologías de la Información adquirida, graduado de la Universidad Estatal de Milagro, (Ecuador). Magíster en Administración y Dirección de Empresas adquirida, graduado de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, (Ecuador). Especialista en Tecnologías de la Información, mención en Comercio y Negocio Electrónico, de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, (Ecuador).
[2]Licenciado en Sistemas de Información, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (Ecuador). Magíster en Administración y Dirección de Empresas, graduado de la Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, (Ecuador). Magíster Universitario en Ingeniero de Software y Sistemas Informáticos, graduado de la Universidad Internacional de la Rioja, (España).
[3]Ingeniero de Software, graduado de la Universidad Estatal de Milagro, (Ecuador).
[4]Ingeniero Industrial graduado de la Universidad de Guayaquil, (Ecuador).

Resumen

Esta revisión sistemática tuvo como objetivo identificar y caracterizar los sistemas de Internet de las cosas y sensado inteligente desarrollados para la cadena del cacao, del vivero al grano seco, con énfasis en el monitoreo del agua y del microclima y su madurez tecnológica. Se siguió la guía PRISMA 2020 con un protocolo registrado. En octubre de 2026 se realizaron búsquedas en nueve bases de datos, en Google Académico y mediante el rastreo de citas, y se incluyeron artículos y ponencias de acceso abierto publicados entre 2015 y 2026. Dos revisores seleccionaron los estudios, evaluaron la calidad del reporte y asignaron los niveles de madurez tecnológica independientemente. Se incluyeron 52 estudios de diez países. Dos tercios trataban la poscosecha: secado y fermentación. Predominaron las placas de bajo costo, y solo la mitad de los sistemas transmitía datos. La temperatura y la humedad relativa del aire fueron las variables medidas con mayor frecuencia; ningún estudio midió el déficit de presión de vapor, el potencial hídrico ni el riego aplicado, y solo dos cerraron el lazo de riego con sensores. El 58 % actuaba de forma automática, casi siempre por umbral. Solo una cuarta parte de los estudios informó la calibración de los sensores y ningún sistema superó el nivel 6 de madurez. Esta tecnología se concentra en la poscosecha del cacao y permanece en etapa de prototipo; urge medir el estado hídrico en campo, validar con productores durante campañas completas y reportar la calibración, la energía y el costo.

Palabras clave: Cacao, Theobroma cacao, Agricultura de precisión, Fermentación, Secado.

Abstract

The aim of this systematic review was to identify and characterise the Internet of Things and smart sensing systems developed for the cocoa chain, from nursery to dry bean, with emphasis on water and microclimate

monitoring and on their technology readiness. The PRISMA 2020 guideline was followed with a protocol registered in advance in a public registry. In October 2026, searches were conducted in nine databases and Google Scholar, and citation searching was performed. Open-access articles and conference papers published between 2015 and 2026 were included. Two reviewers independently selected the studies, appraised reporting quality and assigned technology readiness levels. Fifty-two studies from ten countries were included. Two thirds addressed post-harvest processes: drying and fermentation. Low-cost boards predominated, and only half of the systems transmitted data. Air temperature and relative humidity were the most frequently measured variables; no study measured vapour pressure deficit, water potential or applied irrigation, and only two closed the irrigation loop with sensors. Fifty-eight percent of the systems operated automatically, almost always through thresholds. Only a quarter of the studies reported sensor calibration, and no system exceeded readiness level 6. This technology in cocoa is concentrated in post-harvest and remains at the prototype stage; field water-status sensing, validation with farmers over full seasons and reporting of calibration, energy and cost are urgently needed.

Keywords: Cacao, Theobroma cacao, Precision agriculture, Fermentation, Drying.

Resumo

O objetivo desta revisão sistemática foi identificar e caracterizar os sistemas de Internet das coisas e de sensoriamento inteligente desenvolvidos para a cadeia do cacau, do viveiro à amêndoa seca, com ênfase no monitoramento da água e do microclima e na sua maturidade tecnológica. Seguiu-se a diretriz PRISMA 2020 com um protocolo previamente registrado. Em outubro de 2026, foram realizadas buscas em nove bases de dados e no Google Acadêmico, além do rastreamento de citações, e foram incluídos artigos e trabalhos de congresso de acesso aberto publicados entre 2015 e 2026. Dois revisores selecionaram os estudos, avaliaram a qualidade do relato e atribuíram os níveis de maturidade tecnológica de forma independente. Foram incluídos 52 estudos de dez países. Dois terços tratavam da pós-colheita: secagem e fermentação. Predominaram placas de baixo custo, e apenas metade dos sistemas transmitia dados. A temperatura e a umidade relativa do ar foram as variáveis medidas com maior frequência; nenhum estudo mediu o déficit de pressão de vapor, o potencial hídrico ou a irrigação aplicada, e apenas dois fecharam o ciclo de irrigação com sensores. Cinquenta e oito por cento dos sistemas atuavam automaticamente, quase sempre por limiar. Apenas um quarto dos estudos relatou a calibração dos sensores, e nenhum sistema ultrapassou o nível 6 de maturidade. Conclui-se que essa tecnologia no cacau se concentra na pós-colheita e permanece em fase de protótipo; é urgente medir o estado hídrico no campo, validar com produtores durante safras completas e relatar a calibração, a energia e o custo.

Palavras-chave: Cacau, Theobroma cacao, Agricultura de precisão, Fermentação, Secagem.

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo tropical perenne producido principalmente por pequeños agricultores de África Occidental, América Latina y el Sudeste Asiático. Su productividad depende en gran medida del agua y de la demanda atmosférica: el cultivo es sensible al déficit hídrico del suelo, a las altas temperaturas y al déficit de presión de vapor (VPD) (Lahive et al., 2019), y los modelos de cultivo señalan estos factores como centrales en la variabilidad del rendimiento ante el cambio climático (Tosto et al., 2023). Durante la sequía de 2015/16 en Ghana, la competencia por el agua con los árboles de sombra elevó la mortalidad del cacao en sistemas agroforestales (Abdulai et al., 2018). Después de la cosecha, la temperatura de la masa en fermentación, la temperatura y la humedad del aire de secado

determinan la calidad física, química y sensorial del grano y con ella, su valor comercial (Hii, 2025). El Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) permite monitorear y gestionar estas variables de forma continua mediante redes de sensores, microcontroladores y enlaces de comunicación de bajo costo. Estos sistemas adquieren datos de forma automática, los transmiten y en algunos casos, accionan controles.

En cultivos análogos como el café ya existen revisiones sistemáticas sobre IoT y agricultura 4.0 (Sott et al., 2020). En el cacao, en cambio, la literatura está dispersa en revistas regionales y actas de congresos en inglés, español, portugués e indonesio, y predominan en ella los prototipos de los países productores. Las síntesis previas no cubren este vacío. Las revisiones sistemáticas sobre el cacao han tratado la inteligencia artificial y la visión por computador (Apicella, 2025), la innovación tecnológica en la industria de transformación (Algoner et al., 2024) o el IoT y la inteligencia artificial en la agricultura ecuatoriana en conjunto (Basurto y Parraga, 2026).

Una revisión narrativa sobre el monitoreo de la temperatura y la humedad del suelo en el cacao no evaluó sistemas concretos (Costa y Nunes, 2026). La síntesis más cercana, una revisión narrativa de la inteligencia artificial, el sensado y la robótica en la cadena cacao-chocolate, concluyó, sin cuantificarlo, que la mayoría de las tecnologías permanece en fase de laboratorio o de prototipo (Wader et al., 2026). Hasta donde conocemos, ninguna revisión sistemática ha examinado los sistemas IoT y de sensado inteligente en el cacao, cómo gestionan el agua, el microclima y qué madurez han alcanzado. Esta revisión aborda ese vacío. Su objetivo fue identificar, caracterizar y evaluar los sistemas IoT y de sensado inteligente desarrollados para la cadena del cacao, desde el vivero hasta el grano seco, con el agua y el microclima como eje central y el nivel de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) como medida de su avance. Se plantearon cinco preguntas: (PI1) ¿en qué etapas de la cadena, en qué países y con qué propósito se han desarrollado estos sistemas?; (PI2) ¿qué arquitecturas usan?; (PI3) ¿qué variables de agua y microclima monitorean o controlan, cómo las miden y cómo convierten las mediciones en decisiones?; (PI4) ¿qué madurez tecnológica, qué desempeño técnico y qué resultados agronómicos o de calidad informan?; y (PI5) ¿qué calidad de reporte tienen los estudios y qué barreras de adopción y vacíos de investigación se identifican?

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática con síntesis narrativa estructurada, conforme a la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021) y su extensión para la búsqueda PRISMA-S (Rethlefsen et al., 2021). El protocolo, elaborado según PRISMA-P (Moher et al., 2015), se registró en OSF Registries con el formulario general para revisiones sistemáticas (van den Akker et al., 2023) el 11 de octubre de 2026, antes de la búsqueda formal (https://osf.io/fu8mw). Las cuatro enmiendas posteriores se describen al final de esta sección.

Los estudios debían cumplir seis criterios (Tabla 1): (C1) tratar *T. cacao* en cualquier etapa desde el vivero hasta el grano seco comercializable; (C2) describir un sistema que adquiere datos automáticamente de al menos un sensor físico in situ y que, además, los transmite, los registra para monitoreo continuo o acciona un control automático; (C3) ser un estudio primario que desarrolla, implementa, simula o evalúa el sistema y reporta al menos un resultado técnico; (C4) ser un artículo de revista

o una ponencia de congreso con ISSN o DOI; (C5) estar publicado entre 2015 y la fecha de búsqueda en inglés, español o portugués; y (C6) tener texto completo gratuito por cualquier vía. El motivo de exclusión se asignó de forma jerárquica (E1 → E6), con 16 reglas de decisión para los casos frecuentes; por ejemplo, la clasificación de imágenes sin un sistema de sensado desplegado y los estudios de ecofisiología con registradores sin transmisión se excluyeron por E2. La cadena de búsqueda combinó un bloque de cacao (*cacao, cocoa, Theobroma cacao, cacau*) con un bloque de tecnología que abarcaba el IoT y el sensado conectado, la automatización con sensores y los fermentadores, secadores o sistemas de riego automatizados, y excluyó el homónimo de redes *CoAP* ("congestion control").

Tabla 1. *Criterios de elegibilidad.*

Criterio	Inclusión	Exclusión (código)
C1 Cultivo y etapa	*T. cacao* desde el vivero hasta el grano seco (plantación, cosecha, fermentación, secado, almacenamiento, trazabilidad)	Otros cultivos; industria del chocolate; subproductos (E1)
C2 Tecnología	Adquisición automática desde ≥ 1 sensor físico in situ, más transmisión, registro continuo o control automático	Visión por computador o aprendizaje automático sin sistema desplegado; teledetección sin IoT; instrumentos de laboratorio; sin sistema (E2)
C3 Diseño	Estudio primario que desarrolla, implementa, simula o evalúa un sistema y reporta ≥ 1 resultado técnico	Propuestas conceptuales; revisiones; editoriales (E3)
C4 Publicación	Artículo de revista o ponencia con ISSN o DOI	Ponencias sin ISSN ni DOI; tesis; preprints; capítulos; patentes (E4)
C5 Año e idioma	2015–2026; inglés, español o portugués	Otros (E5)
C6 Acceso	Texto completo gratuito por cualquier vía	Sin acceso gratuito: se registra como no recuperado (E6)

Fuente: Elaboración propia.

Se ejecutó el 11 de octubre de 2026 en Scopus, IEEE Xplore, OpenAlex, ScienceDirect, DOAJ, SciELO, Redalyc, Dialnet y AGRIS, limitada a 2015–2026. Como métodos adicionales, se usaron Google Académico (los primeros 400 resultados de dos consultas) y una ronda de búsqueda por citas hacia atrás y hacia adelante en OpenAlex. La estrategia recuperó los 12 estudios de un conjunto de validación. Las cadenas por base, las adaptaciones técnicas y la bitácora PRISMA-S están disponibles en el material suplementario. Los registros se deduplicaron por DOI y por comparación aproximada de títulos (rapidfuzz, ≥ 0,95), con revisión manual de los casos dudosos. El cribado por título y resumen lo hicieron de forma independiente un revisor humano (R1) y un revisor de inteligencia artificial (R-IA) con los mismos criterios documentados, tras dos rondas de calibración sobre muestras aleatorias de 50 registros (κ de Cohen de 0,80 a 0,83; κ = 0,81 en el conjunto). Un registro pasaba a texto completo si cualquiera de los dos lo marcaba como incluido, probable o dudoso, de modo que la IA nunca excluyó un registro por sí sola; un segundo revisor humano (R2) auditó una muestra de las exclusiones concordantes, con 2 discrepancias de 49 (4,1 %). Los textos completos se buscaron en la página del editor, en Unpaywall/OpenAlex, en repositorios institucionales y mediante solicitud a los autores de correspondencia. R1 y R2 evaluaron los textos completos de forma independiente y resolvieron las discrepancias por consenso. Se usó un libro de códigos de 47 variables en siete grupos (bibliográficas, contexto, propósito, arquitectura, agua y microclima, validación y TRL, y adopción), que se pilotó con cinco estudios y se ajustó dos veces (versión 1.2). R1 extrajo los datos de todos los estudios y R2 cotejó el 100 % de los campos con el texto completo; las diferencias se resolvieron por consenso. Los datos no informados se codificaron como "NR" y los no aplicables

como "NA". No existe una herramienta estándar para evaluar prototipos de ingeniería agrícola. Se adaptaron los criterios de calidad de los estudios empíricos en ingeniería de software (Dybå y Dingsøyr, 2008); (Kitchenham y Charters, 2007) a una lista de diez ítems (Q1–Q10): objetivo, contexto de despliegue, arquitectura reproducible, calibración de los sensores frente a una referencia, diseño de la evaluación, métricas cuantitativas de desempeño, resultados agronómicos o de calidad, energía o autonomía, costo y limitaciones con disponibilidad de datos o código.

Cada ítem se puntuó con 1 (sí), 0,5 (parcial) o 0 (no); una puntuación ≥ 7 se calificó como alta, de 4 a 6,5 como media y < 4 como baja. La madurez se calificó con la escala de nueve niveles de la Comisión Europea (Comisión Europea, 2014) adaptada a la agricultura: TRL 4, prototipo validado en laboratorio o en un fermentador o secador experimental; TRL 5, validado en un entorno relevante (vivero, parcela experimental o lote real de fermentación); TRL 6, demostrado en una finca o cooperativa durante un periodo definido; y TRL 7, usado por productores durante al menos una campaña. R1 y R2 aplicaron ambos instrumentos de forma independiente (κ ponderado lineal) y acordaron las calificaciones finales por consenso.

Dada la heterogeneidad de diseños y resultados, no se planificó un metaanálisis; la síntesis siguió la guía SWiM (Campbell et al., 2020). Los estudios se agruparon por etapa (campo y vivero, fermentación, secado, otras) y, dentro de cada etapa, por familia de comunicación y tipo de decisión (control automático, alerta o accionamiento manual remoto, solo monitoreo). Los códigos de arquitectura y automatización derivados del texto extraído los asignó un autor y los auditaron R1 y R2. Las medianas y los rangos se informaron solo con al menos tres estudios ($k \geq 3$), y las comparaciones entre subgrupos solo con al menos cuatro estudios por nivel. Los resultados se representaron en un mapa de brechas de evidencia (etapa × variable × TRL), y los análisis de sensibilidad repitieron las tablas principales sin los estudios de calidad baja y sin las ponencias.

La certeza de cada hallazgo principal (alta, moderada, baja o muy baja) se juzgó con un enfoque adaptado de GRADE-CERQual (Lewin et al., 2018), considerando la calidad de los estudios, la consistencia, la madurez (proporción con TRL ≥ 5), la aplicabilidad a la pequeña producción y la adecuación de los datos; R1 y R2 acordaron los juicios. El sesgo de acceso se evaluó comparando los metadatos de los informes no recuperados con los de los informes recuperados; el de reporte, con la proporción de estudios sin métricas ni resultados; y el lingüístico, contando los informes excluidos por idioma.

Se registraron cuatro enmiendas: (1.1) adaptaciones técnicas de la búsqueda en Scopus, IEEE Xplore, AGRIS, Redalyc y Google Académico, y la falta de acceso a Web of Science; (1.2 y 1.3) aclaraciones del libro de códigos tras el piloto y la verificación de la extracción; y (1.4) el cierre de las solicitudes a autores el 18 de octubre de 2026, antes de las tres semanas previstas, porque ninguna de las enviadas el 12 de octubre recibió respuesta. Un modelo de inteligencia artificial actuó como segundo revisor en el cribado por título y resumen, con las salvaguardas descritas, y asistió en la redacción del protocolo, los scripts, los códigos derivados y este manuscrito. Las decisiones sobre la elegibilidad a texto completo, las calificaciones de calidad y TRL, la extracción y los juicios de certeza los

tomaron o verificaron los revisores humanos, que asumen la responsabilidad del contenido. Los datos y scripts se depositarán en OSF/Zenodo.

Resultados y discusión

La búsqueda identificó 1.024 registros (849 de bases de datos, 161 de Google Académico y 14 de la búsqueda por citas). Tras eliminar 342 duplicados, se cribaron 682 registros y se excluyeron 488 (Figura 1). De los 194 informes buscados, 53 (27 %) no tenían texto completo gratuito. De los 141 evaluados a texto completo (κ = 0,89; acuerdo del 95 %), se excluyeron 89, sobre todo por no tener un sistema de sensado automatizado (E2, n = 34) o por el tipo de publicación (E4, n = 32), y se incluyeron 52 estudios. La Tabla 2 resume sus características.



Figura 1. *Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la identificación, el cribado y la inclusión de los estudios.*

Fuente: Elaboración propia.

Los 52 estudios se publicaron entre 2015 y 2026, 29 de ellos (56 %) desde 2023 (Figura 2). Proceden de diez países, todos en la franja cacaotera (Figura 3): Indonesia (15), Ecuador (11), Colombia (10), Perú (5), Brasil (3), Filipinas (3), Nigeria (2), Costa de Marfil (1), Malasia (1) y El Salvador (1). América Latina aportó 30 estudios (58 %), Asia 19 (37 %) y África 3 (6 %). Hubo 39 artículos de revista y 13 ponencias; 34 en inglés, 17 en español y uno en portugués. Un tercio de las fuentes no tenía indexación conocida y 24 estudios se publicaron en revistas de acceso abierto diamante: la investigación aplicada sobre cacao circula por canales regionales, lo que justifica haber buscado en español y portugués y haber incluido ponencias. El secado (n = 17) y la fermentación (n = 16) reunieron casi dos tercios de los estudios, seguidos de las plantaciones (n = 14) y del vivero (n = 1); almacenamiento, trazabilidad y sistemas de varias etapas sumaron cuatro. Los perfiles regionales difieren: en América Latina, 11 de 30 estudios trataron el campo o el vivero, mientras que en Asia 16 de 19 trataron la poscosecha. Veintiún sistemas se probaron en laboratorio, 13 en fincas, 6 en parcelas experimentales, 7 en cooperativas, centros de acopio o plantas de beneficio y uno en vivero; cuatro no informaron la escala.

Predominaron las placas abiertas y de bajo costo (Tabla 3): Arduino o microcontroladores ATmega en 21 sistemas (40 %), ESP32 o ESP8266 en 16 (31 %), Raspberry Pi en 6 (12 %) y controladores lógicos programables (PLC) en 7 (13 %), todos estos últimos dedicados a la poscosecha (Atiencia Fuentes et al., 2024); (Castellanos et al., 2025); (Guzmán et al., 2020); Jiménez y Pizango, 2023); (Martínez et al., 2020); (Rodríguez et al., 2020); (Tuanama et al., 2025).

Solo 26 sistemas (50 %) transmitían datos de forma inalámbrica o a Internet; la otra mitad almacenaba o mostraba los datos localmente (pantalla, tarjeta SD, HMI o computadora por cable). La transmisión fue más frecuente en campo (12 de 15; 80 %) que en fermentación (7 de 16; 44 %) o secado (5 de 17; 29 %). En los estudios que identificaron la tecnología (17 estudios), predominó el Wi-Fi (12), seguido de LoRa/LoRaWAN (3) (Flores-Cortez et al., 2026; Guillermo et al., 2019; Hidalgo Larrea et

al., 2024), Zigbee (2) (Celis et al., 2020; Guillermo et al., 2019) y GSM/GPRS (2) (Babalola et al., 2023); (Freire Carrera et al., 2019); en nueve sistemas que transmitían no se identificó el enlace.

Tabla 2. *Características de los 52 estudios incluidos.*

Estudio	País	Etapa	Controlador	Enlace	Variables de agua y microclima	Decisión	TRL	Calidad
Abijaude et al., 2022	BRA	fermentación	ESP8266	Wi-Fi	T aire; HR aire; T masa fermentación; pH	alerta o manual	5	media
Akbar et al., 2024	IDN	fermentación	ESP32	Wi-Fi	T aire; HR aire; pH	monitoreo	4	media
Ananta et al., 2025	IDN	secado	NA (simulación)	—	HR/T aire de secado	automático	2	baja
Arethaputri et al., 2026	IDN	fermentación	Arduino; Raspberry Pi	—	T aire; HR aire; T masa fermentación; pH	automático	4	media
Arifin et al., 2024	IDN	secado	Arduino	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Atiencia Fuentes et al., 2024	ECU	almacenamiento	PLC	—	—	automático	3	baja
Avilés Montalván, 2025	ECU	vivero	ESP32	Wi-Fi	humedad del suelo	alerta o manual	5	media
Babalola et al., 2023	NGA	campo	Arduino	GSM/GPRS	humedad del suelo; T aire; HR aire	monitoreo	5	media
Cabrera Medina et al., 2020	COL	campo	Arduino	—	humedad del suelo; T aire; HR aire	monitoreo	5	baja
Calderon Vivanco et al., 2024	ECU	campo	datalogger	—	precipitación; T aire; HR aire; viento	monitoreo	3	baja
Castellanos et al., 2025	COL	secado	PLC	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Castillo et al., 2021	PER	fermentación	NR	—	T masa fermentación	automático	5	media
Cazes Ortega et al., 2025	COL	campo	Arduino; Raspberry Pi	—	humedad del suelo; precipitación; T aire; HR aire	automático	6	alta
Celis-Peñaranda et al., 2020	COL	campo	Arduino; Raspberry Pi	Zigbee	humedad del suelo; T aire; HR aire	monitoreo	5	media
Corrales et al., 2024	ECU	secado	ESP32; ESP8266	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Corzo Ruiz y Velazco Capacho, 2018	COL	secado	otro	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Delgado Valdivia y Lazarte Rivera, 2018	PER	fermentación	Arduino	—	T aire; pH	alerta o manual	4	baja
Flores-Cortez et al., 2026	SLV	fermentación	ESP32	LoRa/LoRaWAN; Wi-Fi	HR aire; T masa fermentación; pH	alerta o manual	5	media
Freire Carrera et al., 2019	ECU	campo	Arduino	GSM/GPRS	humedad del suelo; T aire	automático	5	media
Furtado et al., 2020	BRA	secado	ESP8266	Wi-Fi	T aire; HR aire; HR/T aire de secado	alerta o manual	4	media
Gonçalves et al., 2024	BRA	campo	ESP8266	Wi-Fi	precipitación; T aire; HR aire	monitoreo	5	media
Gómez Gómez et al., 2025	COL	trazabilidad	Raspberry Pi	—	T aire; HR aire; T masa fermentación	alerta o manual	5	baja
Guillermo et al., 2019	ECU	campo	Arduino; Raspberry Pi	Zigbee; LoRa/LoRaWAN	humedad del suelo; T aire; HR aire	alerta o manual	3	baja
Guzmán Farfán et al., 2020	PER	fermentación	PLC	—	T masa fermentación; pH	automático	5	media
Hersyah et al., 2022	IDN	secado	Arduino	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Hidalgo Larrea et al., 2024	ECU	campo	ESP32	LoRa/LoRaWAN	T aire; HR aire	monitoreo	5	baja
Ilham et al., 2020	IDN	fermentación	Arduino	—	T masa fermentación	automático	4	baja
Jiménez-Peralta y Pizango-Linares, 2023	PER	fermentación	PLC	—	T masa fermentación; pH	automático	6	media
Koffi et al., 2026	CIV	fermentación	datalogger; otro	—	T aire; T masa fermentación	alerta o manual	4	media
Komolafe y Waheed, 2018	NGA	secado	Arduino	—	HR/T aire de secado	automático	4	media
León Piñeros et al., 2017	COL	secado	Arduino; Raspberry Pi	—	—	automático	3	baja
Martínez Baquero et al., 2020	COL	varias	PLC	—	HR aire; T masa fermentación; HR/T aire de secado; pH	automático	4	media
Molina Aquino et al., 2015	ECU	campo	otro	—	T aire; HR aire	automático	4	baja
Parra et al., 2016	ECU	secado	otro	—	HR/T aire de secado	automático	4	media
Pratopo et al., 2022	IDN	fermentación	ESP32	Wi-Fi	T masa fermentación; pH	monitoreo	5	media
Putra et al., 2020	IDN	secado	NR	—	HR/T aire de secado	automático	4	media
Rincón-Quintero et al., 2023	COL	secado	Arduino	—	T aire; HR aire; HR/T aire de secado	monitoreo	4	media
Rodríguez Pazmiño et al., 2020	ECU	secado	PLC	—	HR/T aire de secado	automático	5	media
Sabila et al., 2025a	IDN	fermentación	ESP32	—	—	alerta o manual	4	media
Sabila et al., 2025b	IDN	fermentación	ESP32	Wi-Fi	T aire; HR aire; pH	automático	4	media
Saguidon et al., 2024	PHL	fermentación	Arduino	—	T aire	automático	5	media
Sambayon et al., 2020	PHL	secado	Arduino	—	HR/T aire de secado; humedad del grano	automático	4	media
Santillán Carranza et al., 2023	ECU	campo	Arduino; ESP8266	Wi-Fi	T aire; HR aire	alerta o manual	3	baja
Santos y Remot, 2024	PHL	fermentación	Arduino	—	T aire; HR aire; pH	automático	5	media
Saputro et al., 2025	IDN	secado	ESP32	—	HR/T aire de secado	automático	4	media
Shawon et al., 2026	MYS	campo	otro	—	humedad del suelo	monitoreo	6	media
Siswanto et al., 2026	IDN	secado	ESP32	Wi-Fi	HR/T aire de secado	automático	6	alta
Suhardi et al., 2019	IDN	campo	Arduino	—	radiación/PAR	monitoreo	5	media
Syahputra et al., 2026	IDN	fermentación	ESP32	Wi-Fi	T aire; HR aire; T masa fermentación; pH	automático	5	alta
Telaumbanua et al., 2021	IDN	campo	Arduino	—	—	automático	6	alta
Tuanama Aguilar et al., 2025	PER	secado	PLC	—	—	automático	6	alta
Vesga Ferreira et al., 2023	COL	trazabilidad	Arduino; ESP8266	Wi-Fi	T aire; HR aire	monitoreo	4	media

Fuente: Elaboración propia.

La fuente de energía no se informó en 25 estudios (48 %). La arquitectura típica (Figura 4) consistió en un sensor de temperatura y humedad conectado a una placa Arduino o ESP,

con Wi-Fi o sin transmisión, que acciona un control por umbral.

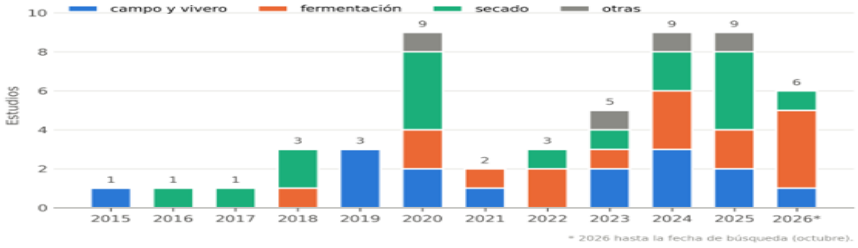


Figura 2. *Estudios incluidos por año de publicación y etapa de la cadena. «Otras» agrupa almacenamiento, trazabilidad y sistemas de varias etapas; 2026, hasta la fecha de búsqueda.*

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. *Países donde se desarrollaron o probaron los sistemas. La franja sombreada marca el cinturón cacaotero (±20° de latitud). Límites: Natural Earth 1:110m.*

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. *Arquitectura de los 52 sistemas.*

Componente	Categoría	Estudios, n (%)
Controlador	Arduino/ATmega	21 (40 %)
Controlador	ESP32	11 (21 %)
Controlador	PLC	7 (13 %)
Controlador	Raspberry Pi	6 (12 %)
Controlador	ESP8266	6 (12 %)
Controlador	otro (PIC, PC, embebido, datalogger propio)	5 (10 %)
Controlador	NR	2 (4 %)
Controlador	datalogger comercial	2 (4 %)
Controlador	NA (simulación)	1 (2 %)
Transmisión inalámbrica o a Internet	sí	26 (50 %)
Tecnología inalámbrica identificada	Wi-Fi	12 (23 %)
Tecnología inalámbrica identificada	LoRa/LoRaWAN	3 (6 %)
Tecnología inalámbrica identificada	Zigbee	2 (4 %)
Tecnología inalámbrica identificada	GSM/GPRS	2 (4 %)
Procesamiento	local	26 (50 %)
Procesamiento	híbrido	10 (19 %)
Procesamiento	nube	10 (19 %)
Procesamiento	NR	4 (8 %)
Procesamiento	edge	1 (2 %)
Procesamiento	NA	1 (2 %)
Fuente de energía	NR	25 (48 %)
Fuente de energía	red eléctrica	8 (15 %)
Fuente de energía	solar + batería	8 (15 %)
Fuente de energía	NA	6 (12 %)
Fuente de energía	batería	3 (6 %)
Fuente de energía	híbrida	1 (2 %)
Fuente de energía	solar	1 (2 %)
Decisión	control automático	30 (58 %)
Decisión	solo monitoreo	12 (23 %)
Decisión	alerta o accionamiento manual	10 (19 %)

Fuente: Elaboración propia.

El predominio del Wi-Fi exige electricidad e Internet en el sitio de despliegue; un estudio eligió sus fincas precisamente porque contaban con ambos (Gonçalves et al., 2024). Las tecnologías de largo alcance y bajo consumo adecuadas para fincas remotas fueron raras, aunque la conectividad y la energía figuran entre las barreras que declaran los autores. Parte de este patrón puede deberse al sesgo de acceso, porque las ponencias de acceso cerrado de IEEE y Springer, infrarrepresentadas aquí, podrían describir arquitecturas más elaboradas.

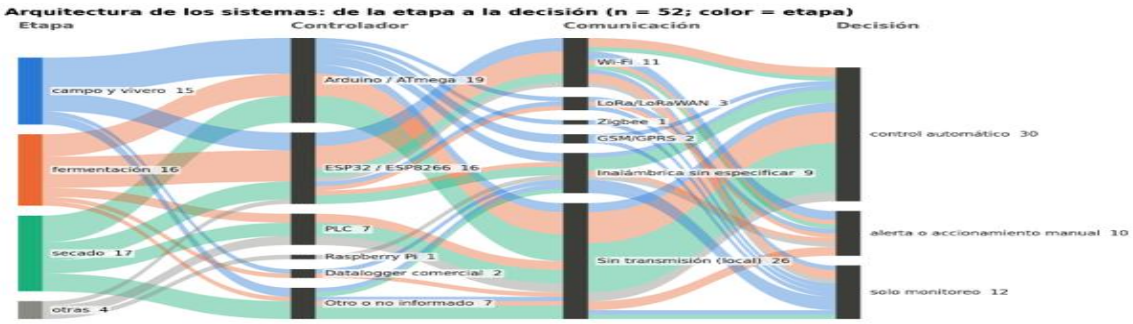


Figura 4. *Diagrama aluvial de la arquitectura típica: etapa → controlador → comunicación → decisión. El ancho de cada banda es el número de estudios y el color, la etapa. Cada estudio se asigna a un único controlador y a una única tecnología principal, por lo que algunos totales son menores que en la Tabla 3.*

Fuente: Elaboración propia.

Cuarenta y siete estudios (90 %) monitorearon al menos una variable de agua o microclima (Figura 5). La temperatura (24 estudios) y la humedad relativa del aire (22) fueron las más frecuentes. En campo y vivero (n = 15), la humedad del suelo se midió en ocho y la precipitación en tres; la radiación fotosintéticamente activa (Suhardi et al., 2019) y el viento (Calderon et al., 2024) se registraron en un estudio por variable. Ningún estudio midió el VPD, el potencial hídrico de la planta, el riego aplicado (caudal o volumen), el mojado foliar ni la temperatura del dosel, aunque diez sistemas de campo medían a la vez la temperatura y la humedad relativa del aire, a partir de las cuales el VPD se calcula directamente. En poscosecha, las variables centrales fueron la temperatura y la humedad del aire de secado (16 sistemas), la temperatura de la masa de fermentación (12), el pH (12) y la humedad del grano (6, todos en secadores). Solo 13 estudios (25 %) informaron la calibración de los sensores frente a un instrumento de referencia, por ejemplo, con soluciones tampón para el pH y termómetros o higrómetros de referencia (Flores et al., 2026); (Pratopo et al., 2022); (Sabila et al., 2025b); (Saguidon et al., 2024), o con el método gravimétrico para la humedad del suelo (Avilés, 2025). El intervalo de muestreo tuvo una mediana de 15 min (k = 21; de 1 s a 24 h). La consigna superior de secado tuvo una mediana de 60 °C (k = 12; 40–60 °C), y la humedad final objetivo del grano fue siempre cercana al 7 % (k = 9; 7–7,5 %), conforme a las normas nacionales. Los controles de fermentación actuaron a una mediana de 50 °C (k = 6; 40–50 °C), y las temperaturas máximas de la masa registradas en los ensayos tuvieron una mediana de 42,4 °C (k = 8; 35,1–51 °C). En riego, los umbrales fueron una humedad del suelo del 70–85 % (Cazes et al., 2025), riego por debajo del 70 % (Avilés,

2025) o un rango entre la capacidad de campo (23 %) y el punto de marchitez (9 %) con reposición de la evapotranspiración estimada por Hargreaves (Freire et al., 2019). Treinta sistemas (58 %) accionaban automáticamente un actuador, diez (19 %) emitían alertas o permitían el accionamiento manual remoto y doce (23 %) solo monitoreaban. Entre los automáticos predominó la lógica de umbral on/off (13), seguida por el control PID o predictivo (3) (Arifin et al., 2024); (Corrales et al., 2024); (Parra et al., 2016), el control difuso (3) (Ananta et al., 2025); (Corzo y Velazco), 2018; (Saputro et al., 2025), las secuencias temporizadas (3), el control basado en aprendizaje automático (2) (Cazes et al., 2025); (Jiménez y Pizango, 2023) y un sistema experto (Putra et al., 2020); cinco no informaron la lógica. El aprendizaje automático apareció en siete estudios, pero solo dos lo usaron para actuar. En campo, solo dos sistemas cerraron el lazo de riego con datos de sensores (Cazes et al., 2025); (Freire et al., 2019); otro regaba por horario sin usar sus sensores (Molina et al., 2015) y otro dependía del accionamiento manual desde una aplicación móvil (Avilés 2025).

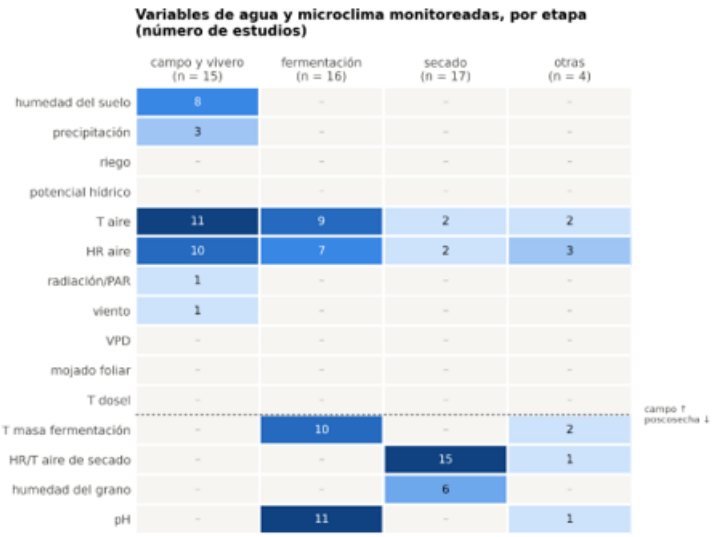


Figura 5. *Variables de agua y microclima monitoreadas por etapa (número de estudios). Sobre la línea discontinua, variables de campo; debajo, de postcosecha.*

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados revelan el hallazgo central de la revisión: un desajuste entre lo que se mide y lo que importa agronómicamente. Los sistemas miden la temperatura y la humedad del aire porque existen sensores baratos para ello, mientras que las variables que gobiernan el estrés hídrico del cacao, como el estado hídrico del suelo y de la planta y el VPD (Lahive et al., 2019); (Tosto et al., 2023), están ausentes. Dado el efecto documentado de la sequía sobre la mortalidad del cacao (Abdulai et al., 2018), la escasez de sistemas validados de riego y de monitoreo del estado hídrico es la brecha más importante identificada. El VPD es, además, una oportunidad de bajo costo, porque bastaría con calcularlo con los datos que ya se registran. En poscosecha, la consigna de secado más usada (60 °C) supera el óptimo de 50–55 °C que

se considera adecuado para la calidad del grano en las revisiones sobre tecnologías de secado (Hii, 2025), y ningún estudio incluido midió la calidad en función de la temperatura de secado. Varios prototipos podrían estar optimizando el tiempo de secado a costa de la acidez y el sabor. En fermentación, los umbrales de control (mediana de 50 °C) concuerdan con el rango de 45–50 °C que citan los propios estudios, pero los lotes experimentales pequeños a menudo no alcanzaron temperaturas óptimas (Pratopo et al., 2022), y las sondas de pH resultaron poco fiables en la masa (Guzmán et al., 2020; (Pratopo et al., 2022). Ningún sistema alcanzó el TRL 7 (Tabla 4; Figura 6). Un estudio estaba en TRL 2, cinco en TRL 3, 22 en TRL 4, 18 en TRL 5 y seis en TRL 6 (Cazes et al., 2025); (Jiménez y Pizango, 2023); (Shawon et al., 2026); (Siswanto et al., 2026); (Telaumbanua et al., 2021); (Tuanama et al., 2025); la mediana fue TRL 4 y el 77 % de los estudios se situó en TRL 4–5. El secado fue la etapa más rezagada (mediana TRL 4; 12 de 17 en TRL 4), mientras que los sistemas de campo y de fermentación alcanzaron con más frecuencia TRL 5. El TRL no aumentó con el tiempo (mediana 4 en 2015–2019, 5 en 2020–2022 y 4 en 2023–2026): la producción crece, pero la madurez no. Una lectura posible es que muchos trabajos proceden de proyectos de titulación o de un solo ciclo, sin continuidad. Estos resultados cuantifican la conclusión de la síntesis narrativa más cercana, según la cual la mayoría de las tecnologías de la cadena del cacao permanece en fase de laboratorio o de prototipo (Wader et al., 2026).

Tabla 4. *Nivel de madurez tecnológica (TRL) por etapa de la cadena.*

Etapa	n	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	Mediana
campo y vivero	15	0	3	1	8	3	5
fermentación	16	0	0	7	8	1	5
secado	17	1	1	12	1	2	4
otras	4	0	1	2	1	0	4
Total	52	1	5	22	18	6	4

Fuente: Elaboración propia.

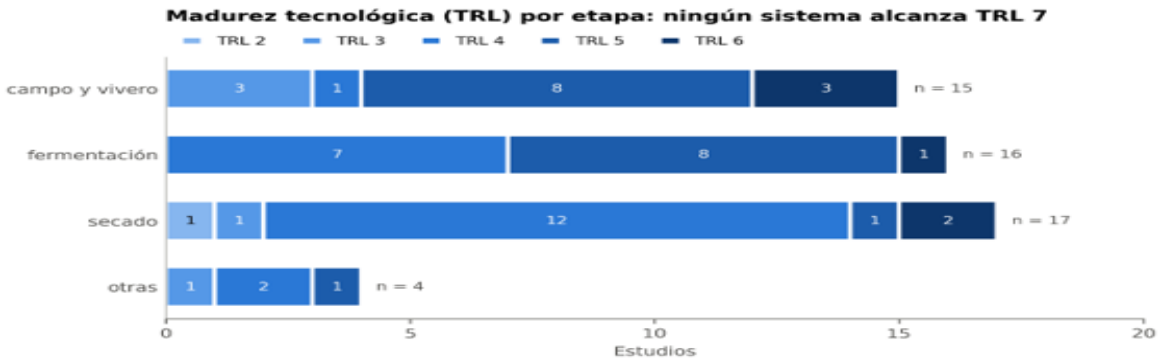


Figura 6. *Nivel de madurez tecnológica (TRL) por etapa de la cadena. Ningún sistema alcanza TRL 7.*

Fuente: Elaboración propia.

Treinta y tres estudios (63 %) usaron algún comparador, a menudo el método tradicional o datos de la literatura. Los secadores instrumentados acortaron el tiempo de secado frente a sus comparadores en una mediana del 47 % (k = 5; 0–57 %) (Hersyah et al., 2022); (Putra et al., 2020); (Sambayon et al., 2020); (Siswanto et al., 2026); (Tuanama et al., 2025), pero, en varios casos, los comparadores no eran simultáneos o procedían de la literatura, y el

único estudio con comparador en la misma cámara no encontró diferencias en el tiempo de secado (Tuanama et al., 2025).

En fermentación, un fermentador rotatorio controlado por PLC alcanzó el 90 % de fermentación en 96 h, frente a los 6–7 días del método artesanal (Guzmán et al., 2020); un sistema controlado por una red neuronal obtuvo un 77,5 % de granos bien fermentados, significativamente más que el método tradicional de la cooperativa (Jiménez y Pizango, 2023); y un sistema IoT con alertas homogeneizó la duración de tres lotes (Abijaude et al., 2022). La calidad del grano (prueba de corte, análisis químico o análisis sensorial) se evaluó solo en cuatro estudios, dos de ellos de forma cualitativa (Koffi et al., 2026); (Saguidon et al., 2024); (Santos y Remot, 2024); (Tuanama et al., 2025).

El ahorro de agua se cuantificó en dos estudios: 25 % frente al riego por temporizador, informado solo en el resumen (Cazes et al., 2025), y 38 % frente al riego manual en un vivero (Avilés, 2025). El costo del sistema se informó en cuatro estudios, desde unos 120 USD para un subsistema IoT (Siswanto et al., 2026) hasta 5.000 USD para un robot de remoción (Tuanama et al., 2025); otros 14 se describieron como "de bajo costo" sin cifras. La calidad del reporte fue alta en 5 estudios, media en 35 y baja en 12 (mediana de 5 sobre 10; κ ponderado entre revisores de 0,62 para la categoría y de 0,74 para el TRL). Los objetivos fueron casi siempre claros (Q1), pero el costo (Q9: 87 % no informado), la energía o autonomía (Q8: 65 %), la calibración (Q4: 60 %) y la disponibilidad de datos o código (Q10: 54 %) fueron los ítems más débiles (Figura 7). Veintinueve estudios (56 %) mencionaron alguna barrera de adopción, sobre todo el costo (9), la robustez en campo (8), la conectividad (7) y la capacitación (7); la energía (4), el mantenimiento (2) y la ciberseguridad (2) fueron menos frecuentes. Estas barreras eran sobre todo opiniones de los autores y no resultados medidos. La participación de productores se informó en 12 estudios y la capacitación en uno, y ningún estudio informó si el sistema siguió en uso después del ensayo.

mapa de brechas (Figura 8) muestra evidencia densa para la temperatura y la humedad del aire en campo, la temperatura de la masa y el pH en fermentación y las condiciones del aire de secado, todas con TRL de hasta 6, y celdas vacías para el riego aplicado, el potencial hídrico, el VPD, el mojado foliar y la temperatura del dosel en todas las etapas. La cosecha no tuvo estudios, y el almacenamiento, la trazabilidad y el vivero, uno o dos cada uno.

Al excluir los estudios de calidad baja (40 estudios restantes) o las ponencias (39 estudios restantes), los resultados principales no cambiaron: ningún sistema alcanzó TRL ≥ 7, la mitad transmitía datos (50–51 %) y el 59–62 % actuaba de forma automática. Los informes no recuperados difirieron de los recuperados: el 53 % eran ponencias (frente al 14 %), el 49 % se encontró en Scopus (frente al 23 %) y el 70 % figuraba como de acceso cerrado en OpenAlex (frente al 12 %), con un año mediano de 2022 (frente a 2024). El corpus incluido sobrerrepresenta, por tanto, la literatura regional de acceso abierto e infrarrepresenta las ponencias de ingeniería de acceso cerrado. Nueve estudios (17 %) no informaron métricas técnicas ni resultados agronómicos. Además, se excluyeron por idioma diez informes en indonesio, tres durante el cribado por título y resumen y siete durante la evaluación a texto completo que cumplían los demás criterios; con ellos, Indonesia habría pasado de 15 a unos 25 estudios.

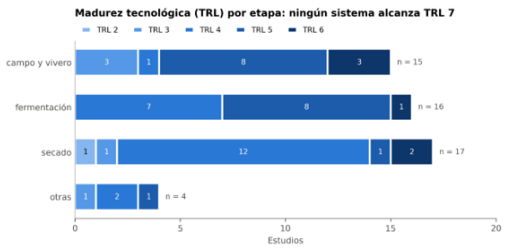


Figura 7. *Calidad del reporte técnico por ítem (Q1–Q10): porcentaje de estudios que cumplen («sí»), cumplen en parte («parcial») o no cumplen («no») cada ítem (n = 52).*

Fuente: Elaboración propia.

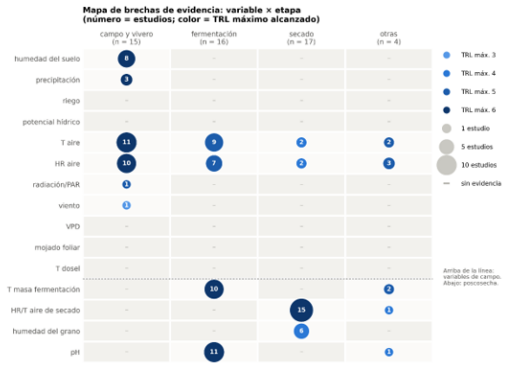


Figura 8. *Mapa de brechas de evidencia: variable × etapa. El tamaño del círculo y el número indican los estudios; el color, el TRL máximo de la celda; «–», sin evidencia.*

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5 resume los hallazgos principales y su certeza. La certeza fue alta para el hallazgo de que ningún sistema ha superado el TRL 6. Fue moderada para los siguientes hallazgos: la temperatura y la humedad de la poscosecha pueden monitorearse y controlarse con hardware de bajo costo; los sistemas de campo se centran en la temperatura y la humedad del aire, con un control de riego incipiente; predominan las arquitecturas de bajo costo y la mitad de los sistemas no transmite datos; y la fiabilidad de la medición rara vez se demuestra. La certeza fue baja para las mejoras del proceso de fermentación y para las barreras de adopción declaradas, y muy baja para la reducción del tiempo de secado atribuible al control automático y para el ahorro de agua. Para cooperativas y servicios de extensión, el monitoreo de la temperatura y la humedad con alarmas en fermentación y secado es la aplicación de menor riesgo, pero conviene probar consignas de secado de 50–55 °C midiendo la calidad, en lugar de los 60 °C predominantes. No hay evidencia suficiente para recomendar el riego automatizado en el cacao más allá de pilotos que midan el agua aplicada.

Quienes adopten un sistema deberían exigir información sobre el costo total, la fuente de energía, la calibración de los sensores y el soporte de mantenimiento, que son justamente los datos que la literatura omite. A diferencia de lo que sugieren las revisiones sobre inteligencia artificial en el cacao (Apicella, 2025), el aprendizaje automático rara vez está integrado en el control desplegado. Y frente a la revisión del IoT en la agricultura ecuatoriana (Basurto y Parraga, 2026), esta revisión es específica del cultivo, multinacional y añade el análisis de la poscosecha y de la madurez. Para los financiadores, la prioridad es apoyar la continuidad del desarrollo desde el TRL 5 hasta el TRL 7, más que la creación de nuevos prototipos. Del mapa de brechas se derivan ocho prioridades (Tabla 6). Proponemos, además, que los estudios futuros informen, como mínimo, el modelo, la exactitud y la calibración de los sensores frente a una referencia; el intervalo de muestreo y la tecnología de comunicación; la fuente de energía y la autonomía medida; el costo de los componentes; la duración, las réplicas y un comparador simultáneo; al menos un resultado agronómico o de calidad; el TRL según una

escala reconocida; y la disponibilidad del código y de los datos. Entre las fortalezas destacan el protocolo registrado con enmiendas documentadas; una búsqueda en tres idiomas en nueve bases de datos y Google Académico, complementada con el rastreo de citas, validada con un conjunto de referencia; la evaluación doble e independiente de la elegibilidad a texto completo (κ = 0,89), de la calidad (0,62) y del TRL (0,74); la verificación del 100 % de la extracción; la asignación del TRL a cada estudio; y la reproducibilidad de los datos y scripts.

Tabla 5. *Resumen de hallazgos y certeza de la evidencia (enfoque adaptado de GRADE-CERQual). Calidad: número de estudios de calidad alta/media/baja (A/M/B).*

Hallazgo	k	Calidad (A/M/B)	Certeza	Razón principal
H1 La temperatura de la masa en fermentación y la temperatura y la humedad del aire de secado pueden monitorearse y controlarse, sobre todo con hardware de bajo costo	31	2/26/3	Moderada	Madurez (la mayoría en TRL 4); exactitud de la medición poco demostrada
H2 Los secadores instrumentados acortan el tiempo frente a sus comparadores; el efecto del control automático no se aísla	5	2/3/0	Muy baja	Pocos estudios; comparaciones indirectas; comparadores no simultáneos o de la literatura; magnitud inconsistente (0–57 %)
H3 El monitoreo o control de la fermentación acelera, homogeneiza o mejora el proceso	6	0/6/0	Baja	Resultados heterogéneos y en parte cualitativos; sin evaluación sensorial estandarizada
H4 En campo se monitorean sobre todo la temperatura y la humedad del aire; el riego automatizado es incipiente (3 sistemas, 2 en lazo cerrado)	15	2/7/6	Moderada	Calidad (6 de 15 estudios con calidad baja)
H4b El riego basado en sensores ahorra agua (25 % y 38 %)	2	1/1/0	Muy baja	k = 2; una cifra solo figura en el resumen
H5 Ningún sistema supera TRL 6; no hay evidencia de uso sostenido	52	5/35/12	Alta	Robusto en ambos análisis de sensibilidad
H6 Predominan arquitecturas de bajo costo (Arduino/ESP, Wi-Fi) y la mitad no transmite datos	52	5/35/12	Moderada	Sesgo de acceso (ponencias técnicas no recuperadas); enlace no identificado en nueve sistemas
H7 La fiabilidad de la medición rara vez se demuestra (calibración informada en el 25 %)	52	5/35/12	Moderada	Sesgo de acceso: las ponencias indexadas en Scopus informan calibración con más frecuencia (4 de 10)
H8 Las barreras de adopción son el costo, la robustez, la conectividad y la capacitación	29	4/20/5	Baja	Opiniones de los autores, no mediciones; poca participación de productores

Fuente: Elaboración propia.

La revisión tiene también limitaciones. Por diseño, solo se incluyó literatura con texto completo gratuito, y el 27 % de los informes buscados no se recuperó, en su mayoría ponencias de acceso cerrado. No se pudo consultar Web of Science ni se completó la revisión por pares de la estrategia de búsqueda (PRESS) (McGowan et al., 2016). La restricción de idioma excluyó diez informes en indonesio y la literatura francófona de África Occidental, lo que infrarrepresenta a Asia y África.

Tabla 6. *Agenda de investigación derivada del mapa de brechas.*

Prioridad	Brecha	Qué se necesita
1	Estado hídrico en campo (sin VPD, potencial hídrico ni riego medido)	Calcular el VPD a partir de la temperatura y la humedad, medir el agua aplicada y validar frente a un riego de referencia durante una estación seca completa
2	Madurez (ningún sistema en TRL ≥ 7)	Despliegues de al menos una campaña con productores como usuarios, línea base simultánea y seguimiento del uso posterior
3	Calidad del grano	Vincular el control de fermentación y secado con la prueba de corte, la acidez y el análisis sensorial estandarizado
4	Fiabilidad de la medición	Calibración en campo frente a referencias e informe de la deriva (pH, humedad del suelo y del grano)
5	Conectividad y energía	LoRaWAN, NB-IoT o almacenamiento y reenvío con energía solar dimensionada en fincas sin red; informar la autonomía
6	Economía	Costos de capital y operación; análisis de costo-beneficio para pequeños productores
7	Etapas sin cubrir	Cosecha, almacenamiento (humedad, micotoxinas) y trazabilidad con lectura automática
8	Reporte	Ítems mínimos de reporte para sistemas IoT agrícolas

Fuente: Elaboración propia.

Un revisor de inteligencia artificial participó en el cribado por título y resumen, aunque no podía excluir registros por sí solo. La lista de calidad se elaboró para esta revisión y no está validada externamente, y la adaptación agrícola de la escala TRL exige juicio en la frontera entre los

niveles 4 y 5. Por último, la heterogeneidad de diseños y el escaso número de estudios por resultado impidieron el metaanálisis.

Conclusiones

A partir de los resultados y de su análisis y discusión, se obtienen las siguientes conclusiones sobre los sistemas de Internet de las cosas y de sensado inteligente en la cadena del cacao: 1) la investigación se concentra en la fermentación y el secado y permanece en etapa de prototipo, pues ningún sistema ha demostrado funcionar en manos de los productores durante una campaña completa; 2) los sistemas miden bien la temperatura y la humedad del aire, pero ignoran las variables de estado hídrico que limitan el cultivo, como el déficit de presión de vapor, el potencial hídrico y el riego aplicado; 3) los beneficios agronómicos y de calidad de la automatización, como la reducción del tiempo de secado o el ahorro de agua, se apoyan en evidencia de certeza muy baja; 4) la mitad de los sistemas no transmite datos y las tecnologías aptas para fincas remotas son excepcionales; y 5) el avance del campo depende menos de nuevos prototipos que de despliegues más largos con productores, de la medición del estado hídrico y de la calidad del grano, y del reporte transparente de la calibración, la energía y el costo.

Referencias bibliográficas

Abdulai, I., Vaast, P., Hoffmann, M., Asare, R., Jassogne, L., Van Asten, P., Rötter, R., & Graefe, S. (2018). Cocoa agroforestry is less resilient to sub-optimal and extreme climate than cocoa in full sun. Global Change Biology, 24(1), 273–286. https://doi.org/10.1111/gcb.13885

Abijaude, J., Sobreira, P., Santiago, L., & Greve, F. (2022). Improving data security with blockchain and Internet of Things in the gourmet cocoa bean fermentation process. Sensors, 22, 3029. https://doi.org/10.3390/s22083029

Akbar, Z., Yuriadi, & Sidehabi, S. (2024). Data acquisition system on cocoa bean fermenter using ESP32 based on MQQT protocol. Jurnal Teknologi Elekterika, 21(2), 131–135. https://doi.org/10.31963/elekterika.v21i2.5108

Algoner, W., Flores-Rosales, E., Valdez-Zavaleta, L., & Malpartida, A. (2024). Systematic review on how technological innovation can improve the cocoa industry. En Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024). https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1069

Ananta, T., Sabillah, C., Assariy, M., Zulqisthi, D., Mariati, C., Candra, P., Silaen, A., Prasetyo, F., Aprilia, W., Subekti, A., & Trianawati, M. (2025). Design of temperature and humidity control system for cocoa bean dryer using fuzzy Mamdani method. Journal of Applied Science, Technology & Humanities. https://doi.org/10.62535/qfzg3m58

Apicella, A. (2025). Intelligent cocoa: A systematic review of artificial intelligence applications in the cocoa supply chain. British Food Journal, 127(12), 4473–4493. https://doi.org/10.1108/BFJ-04-2025-0488

Arethaputri, K., Pratama, I., & Hija, A. (2026). An ANN-driven fermenter system for bacterial health assessment during cocoa bean fermentation. Engineering Reports, 8, e70637. https://doi.org/10.1002/eng2.70637

Arifin, M., Pangaribuan, P., Pramudita, B., & Megantoro, P. (2024). Controlling temperature using proportional integral and derivative control algorithm for hybrid forced convection solar dryer. International Journal of Electrical and Computer Engineering. https://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp239-247

Atiencia, D., Uriarte, E., & García, A. (2024). Diseño del sistema de control, para una máquina ensacadora-pesadora semiautomática de cacao. Revista de

Investigación Científica TSE'DE. https://doi.org/10.60100/tsede.v7i2.233

Avilés, W. (2025). Implementación de un sistema automatizado para la optimización de recursos hídricos en semilleros de cacao en el vivero "Cristhel" Naranjal. Polo del Conocimiento. https://doi.org/10.23857/pc.v10i9.10354

Babalola, T., Babalola, A., Faloye, O., Adabembe, B., & Ogunrinde, A. (2023). Analysis of soil nutrients and water levels using Internet of Things (IoT) for different land use options. 2023 International Conference on Science, Engineering and Business for Sustainable Development Goals. https://doi.org/10.1109/SEB-SDG57117.2023.10124635

Basurto, E., & Parraga, J. (2026). Integration of IoT and artificial intelligence in Ecuadorian agriculture: A systematic literature review (2020–2025). Enfoque UTE, 17(1), 12–22. https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1236

Cabrera, J., Sánchez, I., Medina, F., Vargas, J., Calapsu, E., & Restrepo, D. (2020). Prototype of physical variables measurement system in a cocoa crop. II International Congress on Biorefineries and Renewable Energies Supported in ICTs: BRESICT. https://doi.org/10.16925/ecam.03

Calderon, J., Analuisa, Á., Chango, W., & Aguilar, P. (2024). Aplicación web progresiva para gestionar pronósticos agrícolas en las plantaciones de cacao en Orellana. Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria. https://doi.org/10.61154/mrcm.v10i2.3211

Campbell, M., McKenzie, J., Sowden, A., Katikireddi, S., Brennan, S., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V., & Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: Reporting guideline. BMJ, 368, l6890. https://doi.org/10.1136/bmj.l6890

Castellanos, M., Ordonez, Y., & Carreño, A. (2025). Equipo experimental para el estudio y modelado de procesos agroindustriales orientados a la deshidratación de alimentos. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería. https://doi.org/10.26507/paper.4296

Castillo, J., Belupú, I., & Ipanaqué, W. (2021). Implementation of a stainless steel prototype to improve the fermentation of cocoa beans. 2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control. https://doi.org/10.1109/icaacca51523.2021.9465312

Cazes, R., García, A., Pelayo, J., & Rodriguez, C. (2025). Energy performance analysis of an edge-AI irrigation system for cocoa production in rural Colombia. Heritage and Sustainable Development, 7(2), 1031–1040. https://doi.org/10.37868/hsd.v7i2.1480

Celis, J., Escobar, C., Mora, S., Casadiego, S., Delgado, B., & Guevara-Ibarra, D. (2020). Design of a wireless sensor network for optimal deployment of sensor nodes in a cocoa crop. TecnoLógicas, 23(47), 121–136. https://doi.org/10.22430/22565337.1361

Comisión Europea. (2014). Technology readiness levels (TRL). Horizon 2020 Work Programme 2014–2015, General Annexes, Annex G. https://scholar.google.com/scholar?q=European+Commission+2014+Technology+Readiness+Levels+TRL

Corrales, B., Jaya, L., González, J., & Zambrano, X. (2024). Control system for a cacao drying process: Case study cylindrical dryer. Lecture Notes in Networks and Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51982-6_7

Corzo, C., & Velazco, D. (2018). Control automático de microclima en invernadero para secado eficiente de granos de cacao. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. https://scholar.google.com/scholar?q=Control+automático+de+microclima+en+invernadero+para+secado+eficiente+de+granos+de+cacao

Costa, J., & Nunes, J. (2026). Monitoring soil temperature and moisture in cocoa cultivation: A literature review. Artefactum: Revista de Estudos Interdisciplinares, 25(9), e4229.

https://doi.org/10.23900/artefactum.v25i9.4229

Delgado, S., & Lazarte, J. (2018). Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional. Revista I+i. https://doi.org/10.71701/sr4t3a61

Dybå, T., & Dingsøyr, T. (2008). Empirical studies of agile software development: A systematic review. Information and Software Technology, 50(9–10), 833–859. https://scholar.google.com/scholar?q=Empirical+studies+of+agile+software+development+a+systematic+review

Flores, O., Jiménez, C., Arévalo, F., Valle, W., & Díaz, J. (2026). An IoT architecture for monitoring cocoa fermentation parameters: A small-scale case study. 2026 6th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies. https://doi.org/10.1109/ICECET65726.2026.11633054

Freire, F., Chadrina, O., Velasco, J., Blacio, B., & García-Orellana, Y. (2019). Prototipo de un sistema de riego automatizado en árboles de cacao (Theobroma cacao) controlado vía internet con dispositivos móviles. AVANCES: Investigación en Ingeniería, 16(2). https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.5257

Furtado, W., Vaz, O., Veras, A., Sá, P., & Antunes, A. (2020). Low-cost automation for artificial drying of cocoa beans: A case study in the Amazon. Drying Technology. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1767644

Gonçalves, C., Freitas, D., Jesus, V., Coelho, Á., & Abijaude, J. (2024). Estação meteorológica de baixo custo para monitoramento do microclima na lavoura de cacau. Anais da Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe. https://doi.org/10.5753/erbase.2024.4439

Gómez, J., Parra, C., & Guzmán, J. (2025). Sistema de trazabilidad de cacao soportado en Internet de las cosas. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. https://doi.org/10.24054/rcta.v1i45.3283

Guillermo, J., García, A., Rivas, D., Huerta, M., & Clotet, R. (2019). IoT architecture based on wireless sensor network applied to agricultural monitoring: A case of study of cacao crops in Ecuador. Advances in Intelligent Systems and Computing, 893. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3_3

Guzmán, L., Sánchez, M., Cruz, G., & Arbulú, A. (2020). Diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para la fermentación de cacao criollo piurano. Revista de Innovación y Transferencia Productiva, 1(2), e002. https://doi.org/10.54353/ritp.v1i2.e002

Hersyah, M., Yolanda, D., & Fatma, N. (2022). Cocoa bean dryer and cleaner devise: A microcontroller experiment. Aceh International Journal of Science and Technology, 11(2), 175–181. https://doi.org/10.13170/aijst.11.2.22708

Hidalgo, J., Vásquez, M., Bravo, L., & Yépez, J. (2024). Monitoreo IoT utilizando una red de sensores inalámbricos para el cultivo de cacao. Polo del Conocimiento, 9(11). https://doi.org/10.23857/pc.v9i11.8343

Hii, C. (2025). A review on the technological evolution and advancements of cocoa dryers. Drying Technology, 43(1–2), 130–146. https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2440008

Ilham, D., Balkhaya, B., Candra, R., Hardisal, H., & Hasbaini, H. (2020). Designing an Arduino-based automatic cocoa fermentation tool. SinkrOn: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika, 5(1), 92–99. https://doi.org/10.33395/sinkron.v5i1.10611

Jiménez, F., & Pizango, G. (2023). Sistema inteligente basado en deep learning para la optimización de la fermentación del cacao. Revista Amazonía Digital, 2(1), e277. https://doi.org/10.55873/rad.v2i1.277

Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University y Durham University. https://scholar.google.com/scholar?q=Kitchenham+Charters+2007+Guidelines+performing+systematic+literature+reviews

Koffi, A., Kouadjo, A., Tieu, Z., Soro, B., & N'Goran, Y. (2026). Digitalization of management of cocoa bean fermentation process to guarantee beans quality. Journal of Experimental Agriculture International, 48(7), 476–487. https://doi.org/10.9734/jeai/2026/v48i74347

Komolafe, C., & Waheed, M. (2018). Design and fabrication of a forced convection solar dryer integrated with heat storage materials. Annales de Chimie - Science des Matériaux. https://doi.org/10.3166/acsm.42.22-39

Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience: A review. Agronomy for Sustainable Development, 39, 5. https://scholar.google.com/scholar?q=The+physiological+responses+of+cacao+to+the+environment+and+the+implications+for+climate+change+resilience

León, O., Herrera, W., Londoño, W., & Jiménez, A. (2017). Prototipo de automatización del proceso de secado y selección del cacao a través del procesamiento digital de imágenes. Ciencia e Ingeniería: Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías, 4(1), 52–65. https://scholar.google.com/scholar?q=Prototipo+de+automatización+del+proceso+de+secado+y+selección+del+cacao

Lewin, S., Booth, A., Glenton, C., Munthe-Kaas, H., Rashidian, A., Wainwright, M., Bohren, M., Tunçalp, Ö., Colvin, C., Garside, R., Carlsen, B., Langlois, E., & Noyes, J. (2018). Applying GRADE-CERQual to qualitative evidence synthesis findings: Introduction to the series. Implementation Science, 13(Suppl. 1), 2. https://doi.org/10.1186/s13012-017-0688-3

Martínez, J., Lourido, W., Salazar, D., & Moreno, J. (2020). Automated control of cocoa post-harvest and transformation process to obtain high-quality beans. 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.544

McGowan, J., Sampson, M., Salzwedel, D., Cogo, E., Foerster, V., & Lefebvre, C. (2016). PRESS peer review of electronic search strategies: 2015 guideline statement. Journal of Clinical Epidemiology, 75, 40–46. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2016.01.021

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L., & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. Systematic Reviews, 4, 1. https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1

Molina, B., Palma, Y., & Palma, G. (2015). Sistema de riego automatizado para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en la ESPAM MFL - Ecuador. Revista Tecnológica ESPOL - RTE, 28(2), 100–107. https://scholar.google.com/scholar?q=Sistema+de+riego+automatizado+para+el+cultivo+de+cacao+ESPAM+MFL

Page, M., McKenzie, J., Bossuyt, P., Boutron, I., Hoffmann, T., Mulrow, C., Shamseer, L., Tetzlaff, J., Akl, E., Brennan, S., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J., Hróbjartsson, A., Lalu, M., Li, T., Loder, E., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Parra, P., Ipanaqué, W., & Manrique, J. (2016). Artificial drying of cocoa beans based on a continuous flow revolving system. IEEE Latin America Transactions, 14(6), 2570–2575. https://doi.org/10.1109/tla.2016.7555220

Pratopo, L., Thoriq, A., Purwanto, E., & Wiradwinanda, D. (2022). Temperature and pH monitoring system design in the fermentation of cocoa beans based on Android. Pelita Perkebunan. https://doi.org/10.22302/iccri.jur.pelitaperkebunan.v38i1.494

Putra, B., Waris, A., & Iqbal, I. (2020). Development of solar and gas hybrid energy bed dryer with implementing multivariable

expert system controls. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 486. https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012066

Rethlefsen, M., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A., Moher, D., Page, M., Koffel, J., & PRISMA-S Group. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. Systematic Reviews, 10, 39. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z

Rincón, A., Portillo, L., & Rodriguez, C. (2023). Evaluation of a cocoa dryer prototype using LabVIEW software and Arduino hardware. Heritage and Sustainable Development, 5(2), 363–374. https://doi.org/10.37868/hsd.v5i2.318

Rodríguez, N., Vasquez, P., & Hidalgo, W. (2020). Control automático de temperatura para el secado de cacao en un invernadero de la parroquia Guasaganda del cantón La Maná. Revista DATEH, 2(2). https://scholar.google.com/scholar?q=Control+automático+de+temperatura+para+el+secado+de+cacao+Guasaganda

Sabila, L., Dwiyono, L., Hakim, A., Karuana, A., Hakika, D., & Hanum, F. (2025a). Design of oxygen and carbon dioxide monitoring system in cocoa fermentation with Internet of Things and automatic stirring system. Jurnal Nasional Teknik Elektro, 14(2). https://doi.org/10.25077/jnte.v14n2.1245.2025

Sabila, L., Dwiyono, L., Hakim, A., Karuana, A., & Hakika, D. (2025b). IoT-based monitoring system for temperature and pH control in cocoa fermentation. MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering, 7(1). https://doi.org/10.46574/motivection.v7i1.381

Saguidon, J., Dellosa, J., & Mendoza, R. (2024). Internet-of-Things (IoT)-based automated temperature monitoring and control system for enhanced cacao fermentation quality. International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering. https://doi.org/10.1109/icecie63774.2024.10815649

Sambayon, R., Ancheta, A., Gile, M., Montajes, G., Leorna, V., Saligue, W., & Felicilda, J. (2020). Design, construction and performance evaluation of an automated mixed mode solar tracking cacao dryer. Journal of Science, Engineering and Technology. https://doi.org/10.61569/yg3pbe49

Santillán, H., Suárez, M., & Cárdenas, D. (2023). Development of an IoT tool for optimizing humidity control in cocoa cultivation. Memoria Investigaciones en Ingeniería, 25, 246–265. https://doi.org/10.36561/ING.25.14

Santos, E., & Remot, D. (2024). Classification of cocoa beans based on the grade level of fermentation using KNN algorithm. Indian Journal of Science and Technology, 17(21), 2166–2176. https://doi.org/10.17485/IJST/v17i21.1997

Saputro, A., Iyabu, S., Purnamasari, D., Ulum, M., Ubaidillah, A., & Fahmi, M. (2025). Design and construction of cocoa bean drying equipment for regulating water content using the fuzzy method. JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, 6(2), 88–100. https://scholar.google.com/scholar?q=Design+and+Construction+of+Cocoa+Bean+Drying+Equipment+for+Regulating+Water+Content

Shawon, S., Zaman, M., Maniam, S., Kheng, T., & Wong, H. (2026). Climate-aware hybrid 1D-CNN-LSTM model for multi-layer soil moisture prediction in tropical cocoa plantations. Climate Smart Agriculture, 3, 100096. https://doi.org/10.1016/j.csag.2025.100096

Siswanto, R., Dewintari, P., & Sapar, S. (2026). ESP-NOW based multi-node Internet of Things system for agricultural solar dryers with hybrid offline-online monitoring. International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems. https://doi.org/10.11591/ijres.v15.i2.pp426-438

Sott, M., Furstenau, L., Kipper, L., Giraldo, F.,

Lopez-Robles, J., Cobo, M., Zahid, A., Abbasi, Q., & Imran, M. (2020). Precision techniques and Agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges and future trends. IEEE Access, 8, 149854–149867. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016325

Suhardi, S., Sapsal, M., & Sjahrir, R. (2019). Development of light intensity data acquisition system to identify the suitability of soil conservation plants under the stand of cocoa trees. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 235, 012090. https://doi.org/10.1088/1755-1315/235/1/012090

Syahputra, T., Utomo, A., & Lisda, L. (2026). IoT-based monitoring and assisted classification of cocoa bean fermentation using multimodal sensor data. Inform: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi, 11(2), 130–139. https://doi.org/10.25139/inform.v11i2.12029

Telaumbanua, M., Haryanto, A., Wisnu, F., Lanya, B., & Wiratama, W. (2021). Design of insect trap automatic control system for cacao plants. Procedia Environmental Science, Engineering and Management, 8(1), 167–175. https://scholar.google.com/scholar?q=Design+of+insect+trap+automatic+control+system+for+cacao+plants

Tosto, A., Morales, A., Rahn, E., Evers, J., Zuidema, P., & Anten, N. (2023). Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. Agricultural Systems, 206, 103614. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103614

Tuanama, J., López, C., Pasquel, J., Grández, C., Santa-María, J., Quezada, J., García-Estrella, C., & Pérez, F. (2025). Construction of an automated removal robot for the natural drying of cacao beans. Sensors, 25(5), 1520. https://doi.org/10.3390/s25051520

van den Akker, O., Peters, G., Bakker, C., Carlsson, R., Coles, N., Corker, K., Feldman, G., Moreau, D., Nordström, T., Pickering, J., Riegelman, A., Topor, M., van Veggel, N., Yeung, S., Call, M., Mellor, D., & Pfeiffer, N. (2023). Increasing the transparency of systematic reviews: Presenting a generalized registration form. Systematic Reviews, 12, 170. https://doi.org/10.1186/s13643-023-02281-7

Vesga, J., Contreras, M., & Vesga, J. (2023). Trazabilidad de los bultos de cacao mediante el sistema RFID, soportado en el uso de series de tiempo bajo la arquitectura del IoT. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 24(1), e2911. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:2911

Wader, S., Basha, S., & Mahato, K. (2026). From bean to bar 5.0: Artificial intelligence, sensing technologies and robotics across the cocoa–chocolate value chain. Trends in Food Science & Technology, 177, 106022. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2026.106022

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Luis Cristóbal Córdova Martínez, Daniel Alexander Vera Paredes, Roberto Andres Chuquiana Tapia y Johnny Roddy Lopez Briones.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)

Luis Cristóbal Córdova Martínez: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Daniel Alexander Vera Paredes: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.

Roberto Andres Chuquiana Tapia: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.

Johnny Roddy Lopez Briones.: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.