

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales



Análisis de los sistemas de trazabilidad basados en tecnología blockchain para certificación de condiciones de producción en la industria alimentaria. Situación en España.

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Mónica Martínez Castañeda

Ingeniera Agrónoma.

Madrid, 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Doctorado en Ingeniería de Organización

Análisis de los sistemas de trazabilidad basados en tecnología blockchain para certificación de condiciones de producción en la industria alimentaria. Situación en España.

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Mónica Martínez Castañeda

Ingeniera Agrónoma.

Bajo la dirección de:
Dr. Claudio Feijóo González

Madrid, 2025

Título: Análisis de los sistemas de trazabilidad basados en tecnología blockchain para certificación de condiciones de producción en la industria alimentaria. Situación en España.

Autor: Mónica Martínez Castañeda.

Programa de Doctorado: Doctorado en Ingeniería de Organización

Dirección de Tesis:

Dr. Claudio Feijóo González. Catedrático. Lenguajes y Sistemas Informáticos e Ingeniería de Software. Escuela Superior de Ingenieros Informáticos. Universidad Politécnica de Madrid

Revisores Externos:

Tribunal de Tesis:

Fecha de Defensa de Tesis:

*A mi familia, por su incondicional apoyo y comprensión en cada momento de tiempo
libre que les he robado*

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al doctor Claudio Feijoo, quien ha sido un faro de guía durante todo el proceso de esta tesis. Su orientación ha sido crucial, especialmente en la fase de publicaciones; sin su apoyo, habría sido imposible seleccionar el foro y la orientación adecuada a este trabajo.

A David Arroyo Guardado, le agradezco profundamente sus valiosas indicaciones en el ámbito de la criptografía y la construcción de sistemas, que han sido fundamentales para el desarrollo técnico de esta investigación. Asimismo, extendiendo mi gratitud a Ismael Arribas, cuyas orientaciones en cuanto a la estandarización me han permitido consolidar aspectos clave del proyecto. Finalmente, a Tomás Robles, quien me introdujo en el mundo de Python y me enseñó a crear una demo blockchain, le agradezco su paciencia y generosidad en compartir su conocimiento, lo que ha sido esencial para la realización de esta tesis.

Asimismo, debo agradecer la paciencia a los más de 40 agentes contactados en la investigación de la tesis y en especial a los expertos, entre los que se encuentran los técnicos citados, que respondieron con dedicación los cuestionarios que han servido de base a la investigación. Sin la colaboración y el apoyo de todos ellos, este trabajo no habría sido posible.

Gracias por vuestra dedicación, tiempo y por creer en este proyecto tanto como yo.

Abstract

The new Common Agricultural Policy (CAP) of the European Union, in effect since January 2023, promotes the adoption of technological innovations in the agri-food industry, aiming to differentiate products that comply with European standards. This policy also emphasizes transparency in the food supply chain. Technologies such as Artificial Intelligence (AI), blockchain, and the Internet of Things (IoT) stand out for their potential to enhance efficiency and sustainability in agriculture, as reflected in the 2019 Declaration of the Council of the European Union.

The implementation of the new CAP in Spain marks a milestone in the modernization of the agricultural sector, focusing on the incorporation of new technologies to comply with regulations and ensure food traceability and safety. Among others, it highlights blockchain technology, which emerges as a key tool to improve confidence in information related to food safety and traceability, as well as to prevent fraud and add transparency regarding production conditions. However, the CAP does not specify the details regarding the implementation of blockchain or the involvement of stakeholders in this technological transformation.

The Thesis investigates the development of blockchain technology in the Spanish agri-food sector, focusing on its application to certify production conditions of food. It identifies challenges such as the lack of standards, limited adoption of projects, and the integration of automated data capture.

The first phase of the research analyzes the current state of blockchain technologies in the sector, highlighting that the most successful systems have been those controlled by specific entities, using permissioned systems. However, these systems face challenges in terms of data integration and dependence on additional technologies like IoT to collect and store information.

In the second phase, the research focuses on data architecture, which is fundamental to ensuring the integrity and security of transactions. Proper data management is essential for the success of blockchain in agri-food traceability. The research highlights technical challenges in data processing and offers recommendations to enhance system architecture, focusing on addressing implementation issues like the "oracle problem," where information not stored on the blockchain affects the system's accuracy. This includes the exploitation of databases identified in this study to

promote quality certification systems, in line with CAP regulations and EU legislation.

Finally, the thesis concludes that it is necessary to reorient public policies to address regulatory challenges and suggests a series of measures to promote more “code-like” legislation, such as those enabling the reuse of existing data within the EU. It also emphasizes the importance of training stakeholders on the use of blockchain in agriculture. The sustainability and profitability of blockchain projects and their development for implementation in production to certify production conditions in the food industry depend on these legislative changes, the creation of standards, and the integration of emerging technologies that allow for automated data integration.

Resumen

La nueva Política Agrícola Común (PAC) de la Unión Europea, vigente desde enero de 2023, impulsa la adopción de innovaciones tecnológicas en la industria agroalimentaria, buscando diferenciar productos que cumplen con los estándares europeos. Esta política también enfatiza la transparencia en la cadena de suministro alimentario. Tecnologías como la Inteligencia Artificial (IA), blockchain, y el Internet de las Cosas (IoT) se destacan por su potencial para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la agricultura, tal como se refleja en la Declaración del Consejo de la Unión Europea de 2019.

La implementación de la nueva PAC en España marca un hito en la modernización del sector agrícola, al apuntar a la incorporación de nuevas tecnologías para cumplir con regulaciones y asegurar la trazabilidad y seguridad de los alimentos. Entre otras, apunta a la tecnología blockchain, que se presenta como una herramienta clave para mejorar la confianza en la información relacionada con la seguridad alimentaria y la trazabilidad, además de prevenir fraudes y añadir transparencia sobre las condiciones de producción. No obstante, la PAC no especifica los detalles sobre la implementación de blockchain ni sobre la participación de las partes interesadas en esta transformación tecnológica.

La tesis investiga el desarrollo de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario español, enfocándose en su aplicación para certificar condiciones de producción de alimentos. Identifica desafíos como la falta de estándares, la limitada consolidación de los proyectos y la necesidad de una integración o captura de datos automatizada.

La primera fase de la investigación analiza el estado actual de las tecnologías blockchain en el sector, destacando que los sistemas más exitosos han sido aquellos controlados por entidades específicas, utilizando sistemas permissionados. Sin embargo, estos sistemas enfrentan retos en cuanto a la integración de datos, la falta de estandarización, la escalabilidad y la dependencia del desarrollo de tecnologías adicionales como IoT para recolectar y almacenar información.

En la segunda fase, la investigación se centra en la arquitectura de datos, fundamental para garantizar la integridad y seguridad en las transacciones. La correcta gestión de datos es esencial para el éxito de la blockchain en la trazabilidad agroalimentaria. Se identifican dificultades técnicas en el tratamiento de datos y se proponen recomendaciones para mejorar la arquitectura de los sistemas abordando

los desafíos que presenta su implementación como el problema del "oráculo", que se refiere a la información que no se almacena en la blockchain y su impacto en la veracidad del sistema.

Además, la investigación analiza cómo la tecnología blockchain puede reducir la asimetría de la información y aumentar el poder comercial de los productores al aprovechar las bases de datos públicas existentes en España, haciendo a los agricultores dueños de sus datos para poner en valor su producción. Esto incluye la explotación de las bases de datos identificadas en este estudio para fomentar sistemas de certificación de calidad, en línea con las normativas de la PAC y la legislación de la UE.

Finalmente, la tesis concluye que es necesario reorientar las políticas públicas para abordar los desafíos regulatorios y apunta a una serie de medidas que fomenten una legislación más "code-like", como aquellas que hagan posible la reutilización de datos existentes en la UE. También destaca la importancia de la formación de los agentes sobre el uso de blockchain en la agricultura. La sostenibilidad y la rentabilidad de los proyectos blockchain, y el desarrollo para conseguir implementar modelos estandarizados dirigidos a certificar condiciones de producción en la industria alimentaria, dependen de esas modificaciones legislativas, de la creación de estándares y de la integración de tecnologías emergentes que permitan una integración de datos automatizada.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
<i>Resumen</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xv</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xvii</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i>	<i>xix</i>
<i>Glosario</i>	<i>xxi</i>
1. Introducción	1
2. Estado de la cuestión	3
2.1 Análisis de los estudios bibliográficos existentes.	3
2.2 Primeras conclusiones extraídas de la bibliografía relativas al grado de desarrollo e implantación en el ámbito agroalimentario	4
3. Material y métodos	9
3.1 Metodología empleada en el análisis de la implantación de Tecnologías Blockchain en el Sector Agroalimentario Español para la Certificación de Condiciones de Producción de Alimentos.	10
3.1.1 Investigación documental. Examen, tipificación y selección de la bibliografía	10
3.1.2 Investigación de campo	17
3.2 Metodología empleada en la identificación de limitaciones técnicas y en arquitectura de sistemas con base en blockchain	21
3.2.1 Preguntas de Investigación.	23
3.2.2 Proceso de Búsqueda.	24
3.2.3 Estudio Legal.	26
4. Resultados	29
4.1 Resultados extraídos en la primera fase del estudio: análisis del despliegue de Tecnologías Blockchain en España.	29
4.1.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica.	29

4.1.2 Resultados del trabajo de campo	32
4.2 Resultados extraídos de la segunda fase de la investigación: Identificación de Limitaciones Técnicas y Recomendaciones en la arquitectura y tratamiento de datos.	42
4.2.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica:	42
4.2.2 Variables críticas identificadas en el estudio bibliográfico para mejorar la arquitectura de blockchain en la recopilación de datos y optimizar las respuestas al consenso de red.	43
4.3 Evaluación de Sistemas Públicos y Estudio Legal.	48
4.3.1 Disposiciones específicas que afectan o condicionan el uso de los sistemas de blockchain.	48
4.3.2 Regulación y sistemas de monitoreo que exigen el registro y explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.	50
5. Discusión	52
5.1 Análisis de los datos extraídos del estudio bibliográfico y del trabajo de campo sobre la implementación de blockchain en la industria alimentaria española. . .	52
5.1.1 Tendencias y brechas observadas en el uso de la tecnología blockchain en la industria agroalimentaria.	52
5.1.2 Identificación de proyectos blockchain en el sector agroalimentario en España. Análisis.	56
5.1.3 Valoración de los sistemas analizados.	56
5.1.4 Estandarización en curso de la tecnología blockchain y los datos en la industria agroalimentaria.	62
5.1.5 Gobernanza de las implementaciones basadas en blockchain en la industria agroalimentaria.	64
5.1.6 Escalabilidad de las implementaciones de blockchain en la industria agroalimentaria.	65
5.1.7 Coste, disponibilidad y apoyo público	67
5.2 Examen de las arquitecturas de los sistemas permissionados de blockchain con relación al tratamiento de datos.	68
5.3 Orientaciones prácticas desde el ámbito público.	71
5.3.1 Una regulación más “code-like”.	72
5.3.2 Un código compatible con la legislación vigente.	73
5.3.3 Arquitecturas propuestas.	76

6. Conclusiones	85
Referencias	97
Anexos	108
Anexo A. Colección de Artículos.....	108
Anexo B. Principales disposiciones en materia de control y monitoreo que requieren el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.....	114
Anexo C. Cuestionarios.....	117
Anexo D. Otras Tablas.....	124

Lista de Figuras

Fig. 3.1: Patrón de Búsqueda y Proceso de Cribado en la Base de Datos Scopus de artículos sobre Blockchain en el Sector Agroalimentario en España (enero 2022)	13
Fig. 3.2: Patrón de Búsqueda y Proceso de Cribado en la Base de Datos Google Scholar de artículos sobre Blockchain en el Sector Agroalimentario en España (enero 2022)	16
Fig. 3.3: Tipología de agentes a los que se le dirigió la encuesta	21
Fig. 4.1: Clasificación de los expertos encuestados por categorías profesionales.	33
Fig.4.2: Clasificación de los expertos encuestados por sectores económicos.	34
Fig. 4.3: Clasificación de artículos por temática.	43
Fig. 5.1: Uso común de blockchain entre los agentes de la cadena	58
Fig. 5.2: Proceso de trazabilidad de productos agrícolas	77
Fig.5.2: Pasos Clave en la Auditoría de Sistemas Blockchain en la Industria Agroalimentaria.	71
Fig.5.3: Proceso y flujo de datos	78
Fig.5.4: Representación de reutilización	79
Fig.5.5: Proceso de trazabilidad en productos pesqueros.	81
Fig.5.6: Ilustración sobre la modificación del sistema “provenance” para la reutilización de los registros pesqueros.	82

Lista de Tablas

Tabla 3.2: Resultado de la búsqueda de artículos sobre la implementación de sistemas blockchain.	26
Tabla 4.1: Proyectos en curso o finalizados que utilizan tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a través de la cadena de suministro. (Proyectos identificados a través de la bibliografía y referencias citadas por los agentes)	37
Tabla 4.2: identificación y clasificación de diferentes blockchains y su uso en la industria alimentaria española.	39
Tabla 4.3: Prioridades de Estandarización Blockchain en el Contexto de la Industria Agroalimentaria.	39
Tabla 4.4: Características según su relevancia para la industria agroalimentaria española.	4
Tabla 5.1: Extracción de datos del cuaderno de campo.	79
Tabla A.1 Colección de artículos.	110
Tabla B.1 Principales disposiciones en materia de control y monitoreo que requieren el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.	108
Tabla D1: Soluciones comerciales.	124
Tabla D2: Empresas que ofrecen software para la trazabilidad de productos pesqueros utilizando tecnología blockchain.	126
Tabla D3: Grupos de presión de blockchain en España según la base de datos: "Registro de Transparencia de la UE" ..	127
Tabla D4: Mapa de Agentes.	128
Tabla D5: Proyectos internacionales que se han utilizado como referencia relevante en los análisis de arquitectura de sistemas.	130
Tabla D6: Proyectos en curso o completados que utilizan tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a través de la cadena de suministro.	132
Tabla D7: Fuentes de datos de utilizadas en la plataforma Madrid Rural.	136
Tabla D8: Estructura actual del Cuaderno de Campo.	138

Abreviaturas y acrónimos

AI	Artificial Intelligence (Inteligencia Artificial)
API	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicaciones)
BaaS	Blockchain as a Service (Blockchain como Servicio)
CLM	Castilla-La Mancha
CNMV	Comisión Nacional del Mercado de Valores
COOL	Country of Origin Labeling (Normas de Etiquetado de Origen)
DAO	Decentralized Autonomous Organization (Organización Autónoma Descentralizada)
DB	Database (Base de Datos)
DLT	Distributed Ledger Technology (Tecnologías de Libro Mayor Distribuido)
DOP	Denominación de Origen Protegida
DORA	Digital Operational Resilience Act (Ley de Resiliencia Operativa Digital)
EBSI	European Blockchain Services Infrastructure (Infraestructura de Servicios Blockchain europea)
ECB	European Central Bank (Banco Central Europeo)
eIDAS	Electronic Identification and Trust Services (Identificación Electrónica y Servicios de Confianza)
ERC	Ethereum Request for Comments
ETH	Ethereum
ETC	Ethereum Classic
EU	European Union (Unión Europea)
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de la Alimentación y la Agricultura)
FLP	Fast Ledger Protocol (Protocolo de Libro Mayor Rápido)
GDPR	General Data Protection Regulation (Reglamento General de Protección de Datos)
HPE	Hewlett-Packard Enterprise
IaaS	Infrastructure as a Service (Infraestructura como Servicio)
IBM	International Business Machines Corporation
IGP	Indicaciones Geográficas Protegidas
INCIVE	Instituto Nacional de Ciberseguridad
IoT	Internet of Things (Internet de las Cosas)
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
MiCAR	Markets in Crypto-Assets Regulation (Reglamento de Mercados de Criptoactivos)

MVP	Minimum Viable Product (Producto Mínimo Viable)
NFC	Near Field Communication (Comunicación de Campo Cercano)
PAC	Política Agrícola Común
HP	Hypertext Preprocessor (Preprocesador de Hipertexto)
PO	Point of Origin (Punto de Origen)
PSI	Private Set Intersection (Intersección de Conjuntos Privados)
PYME	Pequeñas y Medianas Empresas (Small and Medium-sized Enterprises)
RDF	Resource Description Framework (Marco de Descripción de Recursos)
REST	Representational State Transfer (Transferencia de Estado Representacional)
SIEX	Sistema de Información de Explotaciones Agrícolas y Ganaderas
RSL	Revisión Sistemática de la Literatura
SaaS	Software as a Service (Software cómo servicio)
SR	Smart Retailer
TE-Food	(Nombre de un sistema de trazabilidad de alimentos basado en blockchain, no un acrónimo)
UNCITRA	
L	United Nations Commission on International Trade Law (Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional)
	Universidad Politécnica de Madrid
UPM	Vessel Monitoring System (Sistema de Monitoreo de Embarcaciones)
VMS	

Glosario:

Contrato Inteligente: función que se aplica ante un evento de trazabilidad, y cuyo resultado es determinista (ante un evento con idénticas propiedades, el resultado es siempre el mismo).

Gobernanza: "Conjunto de esquemas, roles, permisos, políticas y contratos que regulan la trazabilidad del producto fresco en un entorno y contexto determinado.

Nodo: Componente de una red de trazabilidad.

Nodo propietario: "Nodo propietario de la trazabilidad de uno de los potenciales procesos de la cadena alimentaria (producción, comercialización o distribución).

Nodo emisor: Un nodo participante en una red de trazabilidad de cadena alimentaria de producto con capacidad de emitir eventos.

Nodo validador: Son los nodos responsables de evaluar, aprobar, validar y testificar los eventos de trazabilidad.

Nodos Bootstrap: nodos con los que establecer conexión de la red de trazabilidad si se dispone de permisos de acceso. También proporcionan circuitos seguros para comunicar los Nodos Calculadores.

Nodos calculadores: normalmente estarían detrás de un NAT/Firewall) con los nodos validadores, que tendrían direccionamiento público en la red."

Red de trazabilidad. Conjunto de nodos de red que participan en una misma gobernanza de trazabilidad.

Capítulo 1

Introducción

La Política Agrícola Común (PAC) de la Unión Europea, en vigor desde enero de 2023, busca diferenciar productos por calidad, proporcionar mayor transparencia sobre el origen de los alimentos, y sobre las transacciones y los actores involucrados en la cadena de suministro. Al mismo tiempo, en España, se ha propuesto la adopción de nuevas tecnologías para la digitalización del sector agroalimentario como solución para abordar problemas estructurales como la falta de competitividad e innovación. De hecho, los sistemas que utilizan tecnologías relacionadas con blockchain para el control y la trazabilidad de alimentos han experimentado un gran progreso en los últimos años y, actualmente, el uso de blockchain en la gestión de la cadena de suministro casi se duplica año tras año. Sin embargo, aunque muchos expertos sostienen que la tecnología blockchain muestra un gran potencial en el sector agroalimentario, en muchos artículos dedicados a analizar su implantación para certificar condiciones de la producción primaria también se recoge que su implementación todavía está en fase de piloto, y que se requieren más investigaciones para comprender completamente su impacto y sus posibilidades futuras.

En la economía española, la industria agroalimentaria es el subsector industrial más importante con un valor de 107.000 millones de euros generados en ventas, lo que representa casi una cuarta parte de toda la industria manufacturera española. Además, este sector genera el 19 por ciento de todo el empleo industrial español. Sumado a lo anterior, España es el octavo exportador agroalimentario más grande del mundo y el cuarto más grande de la Unión Europea, con 53.179 millones de euros exportados en 2019 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2021). Al mismo tiempo, es un sector que necesita renovación y una profunda transformación digital, a pesar de que el sector agroalimentario español tiene una estructura de costos más baja que la de sus vecinos europeos y competidores. Sin embargo, el tamaño de las empresas también es más pequeño, lo que dificulta competir a gran escala. Esta situación sugiere dos rutas complementarias de cara al futuro además de las prácticas de marketing estándar: el sector debe hacer uso de su capacidad para innovar y extraer valor de lo que ya produce, y debe crear una cadena de valor más coherente y eficiente para hacerla más sostenible, ambas con el apoyo de las tecnologías de transformación digital.

Una de las soluciones tecnológicas citadas (European Commission, 2020) en apoyo a la producción primaria y su valorización en la cadena de comercialización es la tecnología blockchain, pero lo cierto es que las soluciones blockchain desarrolladas hasta ahora en la industria agroalimentaria española, que proporcionan trazabilidad desde el origen y podrían ayudar a los agricultores a valorizar sus productos, no se están consolidando. Esto ocurre a pesar de su potencial para agregar valor añadido mediante la certeza sobre la trazabilidad y la

autenticidad de los productos agroalimentarios, la importancia del sector en la economía española y la aparente existencia de condiciones favorables, como el acceso a financiación a través de los fondos Next Generation y la disponibilidad de tecnología.

Por ello, es crucial verificar si la falta de información realmente refleja la situación en cuanto a la implementación de la tecnología o determinar si se trata de una falta de consolidación, y en ese supuesto, identificar las causas estructurales u organizativas que impiden este avance.

Además, evaluar el estado del arte en cuanto al interés en tecnologías de registro descentralizado, especialmente blockchain, y su potencial integración en un sector tradicional y maduro de la economía española como el agroalimentario, es un análisis útil no solo para valorar su grado de implementación. Considerando que existen políticas activas para fomentar la introducción de estas tecnologías, también es fundamental para determinar la eficacia de estas políticas públicas dirigidas a la digitalización de las empresas agrícolas españolas y extraer lecciones del proceso.

La información disponible sobre proyectos que implementan blockchain para la trazabilidad "de la granja a la mesa" en el sector agroalimentario español es muy limitada. Por lo tanto, el primer objetivo de esta investigación es identificar, recopilar y analizar ejemplos prácticos de estas soluciones en España, así como comprender las razones detrás de su escaso despliegue. Se plantea la hipótesis inicial de que, ya sea por problemas estructurales o porque ya existen sistemas de garantía de trazabilidad a través de controles oficiales, el uso de sistemas de registro descentralizado para certificar condiciones primarias de producción no tiene mucho recorrido o no resulta rentable, a pesar de su potencial.

Para confirmar o no esa hipótesis se explorarán las razones detrás del bajo nivel de adopción de esta tecnología, ya sea por desconocimiento o por dificultades prácticas como problemas de conectividad, falta de infraestructura o competencias digitales insuficientes.

Otro análisis realizado en paralelo se centra en la construcción eficiente de sistemas de trazabilidad basados en blockchain, de manera general y sin limitarse al ámbito nacional. Este estudio incluye la elaboración de conclusiones a partir de la revisión de la literatura disponible sobre el despliegue de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario, con un enfoque particular en artículos que abordan el uso de esta tecnología para certificar las condiciones de producción de alimentos o materias primas a lo largo de la cadena de suministro.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

2.1 Análisis de los estudios bibliográficos existentes.

Los estudios bibliográficos específicos sobre la industria alimentaria y agrícola desarrollados en el contexto de este trabajo ponen de manifiesto como las aplicaciones de la tecnología blockchain comenzaron en 2016 y continuaron recibiendo cada vez más la atención de los académicos, a medida que evolucionan estas aplicaciones, van apareciendo también los artículos dedicados a examinar las limitaciones de la tecnología blockchain para la escalabilidad y su uso para demostrar las condiciones de producción (Tripoli & Schmidhuber, 2018). A partir de entonces, la tecnología blockchain para la industria agroalimentaria siguió recibiendo cada vez más atención de los académicos, especialmente en 2019 y la primera mitad de 2020 (Niknejad et al., 2021). Esto se debió probablemente al desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas de blockchain permissionados que dieron lugar a nuevas generaciones de sistemas de Tecnologías de Registro Distribuido (DLTs) (Romero-Frías et al., 2021), y a nuevos desarrollos en 2020 durante la crisis de Covid con el objetivo de controlar la cadena de suministro.

Además, los resultados de la investigación bibliográfica demuestran que India, China y EE. UU son los países donde más artículos aparecen dedicados a la aplicación de soluciones de blockchain a la cadena alimentaria. Hay que señalar también que, en general, los resultados de las búsquedas bibliográficas (ver siguiente apartado) muestran como los países en desarrollo han dedicado más atención que otros a la tecnología blockchain en el campo agroalimentario en sus artículos científicos, probablemente en relación directa con el peso de la industria agroalimentaria en sus economías y la relevancia que la tecnología blockchain podría tener para dar un salto adelante en un sector clave en la creación de valor para el país.

Quizá la primera recopilación relevante de casos de aplicación práctica a la trazabilidad en el sector primario fue la que hizo la Organización de la Alimentación y la Agricultura (FAO) en su publicación “e-agriculture in action: blockchain for agriculture” (Berneis, 2021), donde se documentan varios ejemplos aplicados a la agroindustria: seguros, identificación de terrenos, tratamiento de aguas o procesos de transformación forestal. De todos estos usos, el interés de este estudio se ha focalizado en específicamente aquellos que utilizan tecnología blockchain para asegurar datos de producción primaria. Sin embargo, en la literatura analizada se habla poco

sobre el uso de la tecnología blockchain para asegurar los datos de producción a lo largo de la cadena de suministro, específicamente en el sector agroalimentario.

En resumen, la literatura científica más reciente está comenzando a examinar aplicaciones consolidadas en la cadena de suministro agroalimentaria, por ejemplo, como medio de pago (Nihit Choudhary, 2020), o para controlar el origen de los lotes y el tiempo de transporte (Yohan et al., 2022). Sin embargo, según estos documentos, la utilidad de la tecnología blockchain para salvaguardar datos relacionados con las condiciones de producción a lo largo de la cadena de suministro de un producto todavía presenta muchos desafíos (Srivastava & Dashora, 2022).

2.2 Primeras conclusiones extraídas de la bibliografía relativas al grado de desarrollo e implantación en el ámbito agroalimentario.

El número de empresas que ofrecen soluciones de trazabilidad para productos agroalimentarios utilizando tecnologías de registro distribuido (DLT) ha crecido considerablemente, especialmente desde 2018. Durante 2020, la pandemia provocó una explosión de inversiones en tecnología para la gestión de la cadena de suministro, centrándose principalmente en conectar a operadores intermedios, como procesadores, distribuidores y verificadores de indicaciones geográficas protegidas (IGP), además de incorporar otras funcionalidades como aplicaciones de pago. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen Full Profile, Heifer y FIE.

La literatura científica (Tripoli & Schmidhuber, 2018) ha señalado las limitaciones de la tecnología blockchain en términos de escalabilidad y su uso para acreditar las condiciones de producción. Sin embargo, también se han identificado aplicaciones consolidadas en la cadena de suministro agroalimentario, como el uso de blockchain para pagos y el seguimiento de lotes desde su origen y control de las condiciones de transporte (Yohan et al., 2022). A pesar de esto, la tecnología aún enfrenta numerosos desafíos para salvaguardar datos relativos a las condiciones de producción a lo largo de la cadena de suministro (Srivastava & Dashora, 2022).

El volumen de publicaciones científicas sobre blockchain aumentó notablemente en 2019 y 2020, probablemente debido al desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas de blockchain permisionados¹, que han llevado a nuevas generaciones de Tecnologías de Libro Mayor

¹ Esta aproximación a sistemas permisionados, que algunos puristas del blockchain la clasifican como una base de datos pueden tener mucho potencial al no necesitar pruebas de trabajo que demanden una cantidad enorme de energía y presentan enormes ventajas frente al manejo tradicional de una base de datos al compatir no sólo los datos sino también el

Distribuido (DLTs) (Romero-Frías et al., 2021). Además, la crisis del Covid en 2020 impulsó el desarrollo de tecnologías para controlar la cadena de suministro.

A partir de 2020, la producción científica internacional sobre blockchain parece haber comenzado a disminuir. En 2021, aunque aún se publicaron numerosos estudios sobre nuevas soluciones tecnológicas basadas en diferentes DLTs como Hyperledger, R3 Corda, IBM Blockchain, Ethereum o Stellar, que ofrecen diversas características para aplicaciones específicas en la trazabilidad de la cadena de suministro, la mayoría de estas aplicaciones no han pasado de la fase de proyectos piloto o han tenido una duración limitada. Los autores destacan las limitaciones de las soluciones existentes en cuanto a número de transacciones por segundo y escalabilidad (Romero-Frías et al., 2021; Srivastava & Dashora, 2022).

Como consecuencia de estas limitaciones, se han documentado casos de "fatiga de blockchain", mencionados tanto en publicaciones científicas (Vaghani et al., 2022) como en artículos divulgativos (Gartner Blog Network). Esta "fatiga" se atribuye no solo a problemas de escalabilidad, sino también a la falta de estándares, convergencia tecnológica, inmadurez, problemas de interoperabilidad, ambición desmesurada y una falta de comprensión clara de cómo esta tecnología puede resolver problemas específicos.

Por sectores, dentro del ámbito agroalimentario, aunque existen bastantes análisis de viabilidad, se encuentran pocos ejemplos en la literatura científica en los que el uso de blockchain se haya traducido en soluciones que puedan consolidarse por aportar un verdadero valor añadido de la producción primaria y, por tanto, que valore la producción agrícola o ganadera en origen.

A pesar de eso, el valor de blockchain como garantía (especialmente de salubridad) de los alimentos fue una utilidad pionera y se puede decir que es el sector agroalimentario uno de los sectores reponsables del desarrollo de servicios como Blockchain as a Service (BaaS). BaaS permite a las empresas y desarrolladores utilizar plataformas de blockchain sin gestionar la infraestructura subyacente, ofreciendo un entorno accesible y rentable para implementar aplicaciones blockchain. Este servicio, similar a otros modelos "as a service" como SaaS e IaaS, facilita la creación, gestión y operación de aplicaciones blockchain, adaptándose a las necesidades específicas de los clientes.

Este aumento en la adopción de BaaS² responde a la necesidad de mayor transparencia y

control de los datos, es decir, cualquiera de los integrantes de la cadena. Estos no necesitan un token con una criptomoneda que deba ser soportada por minería pública.

² La adopción de BaaS ha crecido significativamente, con un mercado proyectado a alcanzar los 39.74 mil millones de dólares para 2027, gracias a su capacidad de reducir barreras de entrada, costes y complejidades técnicas. Los sectores que más se benefician de BaaS incluyen las finanzas, la gestión de la cadena de suministro, la salud y la verificación de identidad. En

eficiencia en diversas industrias, ofreciendo soluciones flexibles y escalables que permiten a las empresas centrarse en sus operaciones principales mientras los proveedores de BaaS se encargan de la gestión técnica.

Por su aparición en las citas bibliográficas, y de aplicación a ese sector, el caso más conocido es probablemente la plataforma BC creada entre Walmart e Hyperdedge antes citada y los proyectos IBM Trustchain (que ya no está en uso). En la actualidad hay un gran número de empresas que ofrecen estos servicios (Microsoft, IBM, Oracle, Amazon, Alibaba, PWC, Oracle y HPE, Baidu, Huawei, Kaleido Hewlett-Packard Enterprise) (Jesús Alfonso & Muñoz Jiménez, 2020) creando sistemas de registro distribuidos para intercambiar información verificable entre agentes identificados (Xiong et al., 2020; Zhang et al., 2021) y algunas han desarrollado soluciones específicas para el sector agroalimentario³ (Berneis, 2021). Partiendo del análisis realizado en este estudio y dentro del ámbito agroalimentario, el “Food Trust” de IBM⁴ parece ser el único proyecto a escala que está en producción. (Noticias Carrefour. 2018) (Cargill., 2018) (Mediterranean Aceite de oliva Producer Uses IBM Blockchain to Fight Food Fraud. 2020)⁵. (Ver tabla D.1 del Anexo D).

Dentro del ámbito agroalimentario la industria pesquera, ha sido uno de las más activas en el desarrollo de soluciones de software con base en tecnologías DLT para ofrecer sistemas de certificación /sellos de garantía de producto (autenticando aspectos relativos principalmente al origen/ manipulación/y tiempo) con el objetivo de ganarse la confianza del consumidor. En el ámbito pesquero se han podido identificar una veintena de referencias (de artículos divulgativos) que apuntan a la utilización de blockchain para garantizar su producto, pero en la práctica, a pesar de que existen muchos proveedores “de soluciones o sellos”, muy pocos se han consolidado de manera estable. Se recogen algunos de los que operan actualmente en la Tabla D.2 (Anexo D).

particular, en la cadena de suministro de alimentos, blockchain mejora la trazabilidad y la confianza, aspectos cruciales para garantizar la seguridad y calidad de los productos.

³ Las más conocidas son la actual Food Trust (IBM), que En principio se trataba de una alianza entre las empresas DOLE; DRISCOLL’S; GOLDEN STATE FOOD, KROGER, McCORNICK, McLANE, NESLÉ, TYSON FOODS, UNILEVER Y WALMART para abordar la seguridad alimentaria y poder asegurar la trazabilidad en caso de contaminación, luego se ha utilizado para plantear pruebas de concepto enfocadas a soluciones concretas para pymes relacionadas con algunos actores.

También puede citarse el ejemplo de SAP, utilizada por la empresa Bumble Bee Foods para documentar la trazabilidad de túnidos procedentes de Indonesia. (Berneis, 2021).

⁴ El sistema de IBM se ha utilizado para los proyectos de pollo campero de Carrefour (Noticias Carrefour. 2018), el pavo de Cargill (Cargill., 2018) o el aceite de oliva de CHO (Mediterranean Olive Oil Producer Uses IBM Blockchain to Fight Food Fraud. 2020) uno de los productores más importantes de aceite de oliva italiano. En estos procesos se utilizaron diferentes puntos de calidad de los procesos, los cuales era posible rastrear utilizando esta tecnología blockchain.

⁵ Referencias completas en Tabla D2 en anexo D: Empresas que ofrecen software para la trazabilidad de productos pesqueros utilizando tecnología blockchain.

A partir de 2020 y a la vez que van apareciendo nuevas arquitecturas de DLT, muchos artículos científicos (Berneis, 2021) presentan como un desafío el que estos sistemas DLT intercambien datos veraces, precisos y validados y también su utilidad, lo que se traduce en un interés académico en el análisis de las entradas externas (gateways) y de los oráculos, es decir: cómo se introducen los datos externos en la red. (los artículos más recientes dan cada vez más importancia a los sistemas IOT y la inteligencia artificial para gestionar datos externos sin intervención humana) o mediante verificación cruzada de datos.

Asimismo, también se analiza la relevancia de la información: en qué medida esos datos son pertinentes para verificar la información mostrada al consumidor (por ejemplo, identidad, condiciones de producción etc.).

Otro de los temas en cuestión que se ha considerado de interés es el valor añadido de la utilización de estos sistemas que llega de manera efectiva, a percibirse por el productor, algo que parece que sólo se produce en productos de gran valor para los que constituye un problema la existencia de falsificaciones.

En cuanto al estado de la tecnología en nuestro país, en revisión bibliográfica sobre literatura científica realizada no se encuentran artículos que hayan llevado a cabo un análisis profundo del estado de implementación esta tecnología en la cadena de suministro en España para certificar condiciones de producción, cuál es su papel y qué arquitecturas de sistemas basados en blockchain se están empleando actualmente en el sector agroalimentario y a qué desafíos se enfrenta.

Asimismo, tanto en España como a nivel internacional, no se han encontrado estudios específicos sobre políticas públicas de fomento o regulación del despliegue y la adopción de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario y, en consecuencia, se plantea la cuestión sobre los mecanismos están disponibles para apoyar su implementación.

La necesidad o idoneidad de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario es un tema importante, especialmente considerando la falta de información detallada al respecto. Se plantea la hipótesis de que la falta de consolidación de proyectos de blockchain podría deberse a problemas estructurales o a la regulación más estricta del sector agroalimentario en la Unión Europea en comparación con otros países. Pero las características de esta tecnología que permite un registro inmutable y transparente de transacciones parece ser idónea para que consumidores, productores y reguladores verificar de manera independiente la procedencia y condiciones de los alimentos. Además, las características de seguridad de blockchain, como la criptografía y el consenso descentralizado, garantizan que los datos no puedan ser manipulados, lo que es

esencial para prevenir fraudes y asegurar la autenticidad de los productos. Blockchain también reduce la necesidad de intermediarios mediante contratos inteligentes, simplificando procesos y reduciendo costos.

Por tanto, a pesar de que la existencia de controles pueda llevar a garantizar la salubridad de los alimentos en Europa, esta tecnología es muy útil de cara a cumplir con las regulaciones alimentarias al proporcionar un registro detallado y verificable de procesos y controles de calidad, facilitando auditorías o para tomar decisiones informadas y puede funcionar como un "suplemento de la ley", reforzando la regulación básica y ofreciendo nuevas vías para alcanzar objetivos legales.

Ante esta situación, se plantean las siguientes cuestiones que tampoco ha abordado la literatura científica examinada: qué orientaciones prácticas pueden implementarse desde el ámbito público para mejorar la adopción de la tecnología blockchain en esta cadena de suministro e incluso la utilidad de los sistemas basados en blockchain pueden complementar o reforzar los sistemas de aseguramiento de trazabilidad existentes mediante controles oficiales.

En definitiva, los estudios analizados sobre el estado de la técnica revelan una serie de cuestiones aún no resueltas. A través de un análisis profundo de los sistemas de trazabilidad basados en tecnología blockchain para la certificación de condiciones de producción en la industria alimentaria, y con un enfoque particular en la situación en España, objeto principal de esta tesis, buscamos responder a estas cuestiones. El objetivo es orientar el aprovechamiento de esta tecnología hacia soluciones útiles que faciliten el cumplimiento de objetivos legales y también la creación de valor en el contexto de la producción y distribución de alimentos.

Capítulo 3

Material y métodos

Para abordar las preguntas planteadas y confirmar las hipótesis, la tesis se ha estructurado en varias fases, cada una de las cuales requirió una metodología específica:

En la primera fase, se realizó un análisis del despliegue de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario español, específicamente enfocadas en la certificación de las condiciones de producción de alimentos. Esto incluyó la identificación y evaluación de proyectos mediante encuestas y entrevistas con expertos.

La segunda fase se centró en identificar las dificultades y limitaciones técnicas sobre la captura y tratamiento de datos con el objetivo de formular recomendaciones para la arquitectura de los sistemas. Este análisis se llevó a cabo a través de una revisión exhaustiva de la literatura.

Por la importante conexión que tienen estos datos con aquellos contemplados en los marcos regulatorios de la Política Agraria Común, también se examinaron los sistemas públicos que imponen obligaciones de información sobre datos alimentarios, dentro del marco de control y seguimiento de la PAC.

El propósito fue optimizar la recopilación de datos para fomentar sistemas de certificación de calidad mediante tecnología blockchain. Además, se presentan estudios de caso que ilustran modelos de arquitectura optimizados para la explotación de datos en sistemas basados en tecnología blockchain dirigidas a certificar condiciones de producción en el ámbito agroalimentario. El estudio también proporciona orientación hacia posibles soluciones que podrían apoyar estos sistemas desde el punto de vista de la administración.

3.1 Metodología empleada en el análisis de la implantación de Tecnologías Blockchain en el Sector Agroalimentario Español para la Certificación de Condiciones de Producción de Alimentos.

Para la primera parte de este estudio, la metodología empleada incluyó una investigación documental complementada con un trabajo de campo a través de encuestas semiestructuradas. Estas encuestas se realizaron a una muestra de expertos seleccionados mediante la técnica de "bola de nieve" (snowball), que facilita la identificación de participantes adicionales a través de las recomendaciones de los ya contactados, una técnica particularmente útil cuando la muestra es limitada (Easterby-Smith et al., 2008).

La investigación bibliográfica abarcó tanto artículos de revistas revisadas por pares como informes de empresas y organizaciones que han implementado soluciones de blockchain para la trazabilidad de alimentos, siguiendo el enfoque "de la granja a la mesa". Dada la escasez de información sobre proyectos específicos en España, las encuestas fueron esenciales para recopilar datos que no estaban disponibles en la literatura académica. Estas encuestas proporcionaron información crucial para el análisis de la tecnología blockchain en el contexto de la implementación de políticas públicas. Se investigaron aspectos como la identificación de proyectos, el grado de adopción de la tecnología en España, y los motivos para elegir blockchain sobre otras tecnologías, además de las mejores prácticas para la participación y compromiso de los actores involucrados.

Las encuestas semiestructuradas permitieron obtener detalles más profundos de individuos y organizaciones, incluyendo evidencia sobre el estado de ejecución de proyectos relevantes en España, los actores específicos involucrados, la financiación y acceso a apoyo público, así como el éxito o razones para el abandono de proyectos. Además, se exploraron los tipos de implementación de blockchain y los modelos de gobernanza adoptados, proporcionando una visión integral sobre el uso y potencial de esta tecnología en el sector agroalimentario español.

3.1.1 Investigación documental. Examen, tipificación y selección de la bibliografía.

En un primer momento, para realizar el estudio se hizo un análisis bibliográfico realizado utilizando la base de datos SCOPUS sobre la industria alimentaria y agrícola en busca de

aplicaciones innovadoras basadas en tecnología blockchain desde 2019 hasta 2022. El método de investigación se ha inspirado en enfoques similares en la literatura (Mazzù et al., 2021), (Stranieri et al., 2021), (Niknejad et al., 2021b), (Barbosa, 2021).

El patrón de búsqueda principal fue el siguiente: "BLOCKCHAIN y ALIMENTOS o AGRICULTURA" y "Blockchain y ALIMENTOS y AGRICULTURA" seleccionando artículos publicados entre los años 2019 y 2022.

La selección de artículos publicados entre los años 2019 y 2022 para este estudio se justifica por varias razones clave. En primer lugar, el periodo elegido coincide con un momento de rápido avance e implementación de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario, reflejando un interés creciente y una aplicación práctica más amplia en esta área. Esto es particularmente relevante dado que la tecnología blockchain ha madurado significativamente en los últimos años, pasando de ser una novedad tecnológica a una herramienta funcional en diversas industrias.

Además, el periodo de 2019 a 2022 permite capturar las innovaciones y aplicaciones más recientes, que son esenciales para entender las tendencias actuales y el estado del arte en la industria. Utilizar artículos más recientes garantiza que el estudio se base en datos actuales y relevantes, evitando así el riesgo de obsolescencia que podría afectar la validez y aplicabilidad de los hallazgos. Este enfoque es consistente con investigaciones anteriores que también han focalizado en períodos recientes para capturar las innovaciones tecnológicas actuales, como se observa en los estudios de Mazzù et al. (2021), Stranieri et al. (2021), Niknejad et al. (2021b), y Barbosa (2021).

Finalmente, la elección de este rango temporal facilita la comparación y el análisis de cómo las tecnologías blockchain han sido adaptadas y adoptadas en respuesta a desafíos contemporáneos, incluyendo las recientes crisis globales como la pandemia de COVID-19, que, tal y como se señaló en el apartado anterior, ha tenido un impacto significativo en las cadenas de suministro globales y, por extensión, en la adopción de tecnologías de trazabilidad como blockchain.

Para identificar proyectos españoles, la selección de la búsqueda en Scopus se realizó de dos maneras, en un primer caso circunscribiendo la búsqueda a la Subárea "España" y en un segundo caso utilizando España como palabra clave. El resultado de la búsqueda en Scopus dio lugar entonces a un número muy pequeño de artículos.

El patrón de búsqueda utilizado y los resultados se muestra en la siguiente figura:

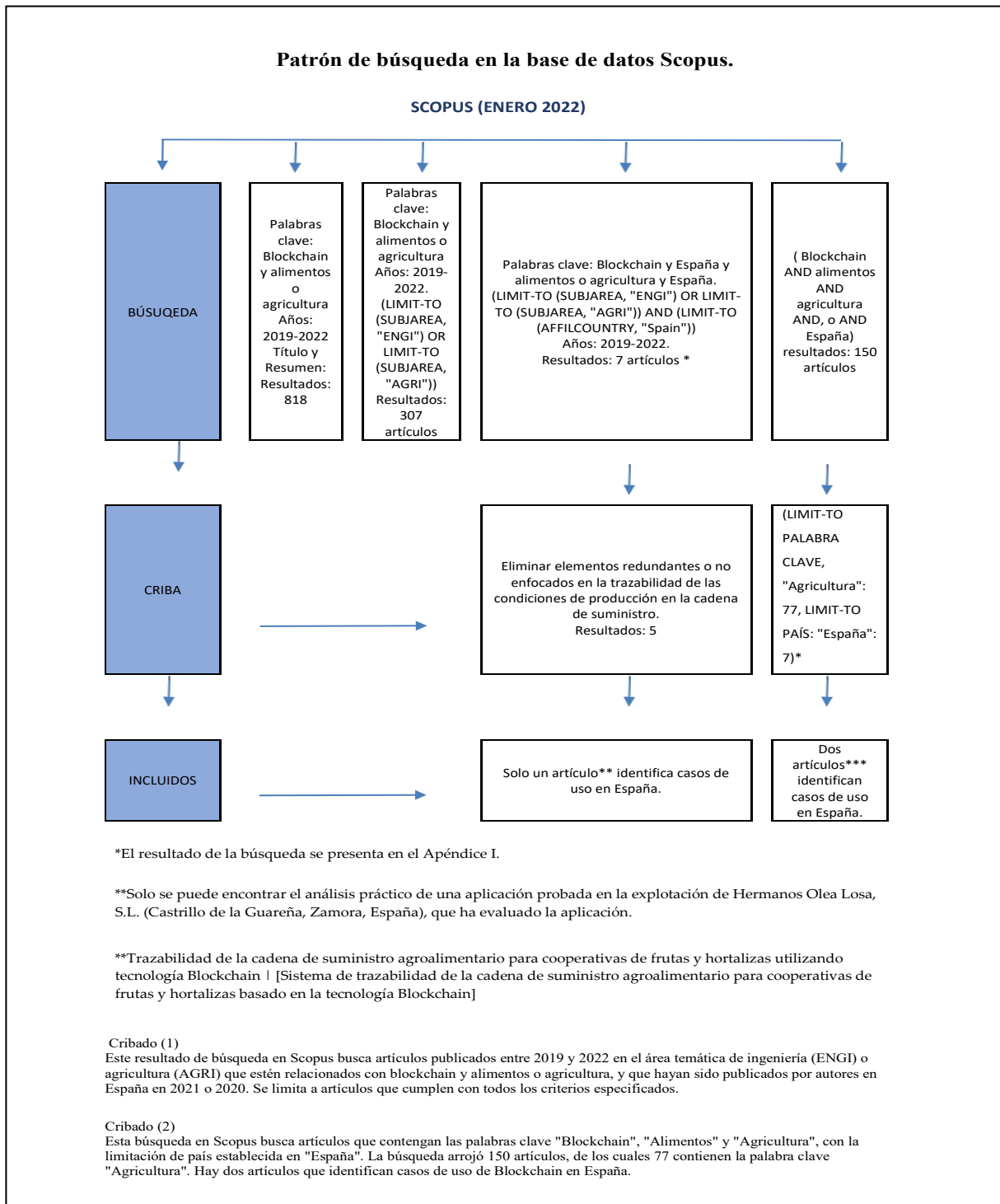


Fig.3.1 Patrón de Búsqueda y Proceso de Cribado en la Base de Datos Scopus de artículos sobre Blockchain en el Sector Agroalimentario en España (enero 2022).

La figura ilustra un proceso de búsqueda y cribado en la base de datos Scopus realizado en enero de 2022, con el fin de identificar artículos sobre la aplicación de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario español. Se comenzó con una búsqueda inicial utilizando las palabras clave "Blockchain" y "alimentos" o "agricultura", restringida al período 2019-2022. Esta búsqueda arrojó 818 artículos.

Posteriormente, se aplicó un filtro para limitar los resultados a los artículos de las áreas temáticas de "Ingeniería" (ENGI) y "Agricultura" (AGRI), lo cual redujo el número de artículos a 307. Para enfocar aún más la búsqueda, se filtraron los artículos publicados por autores en España, resultando en 7 artículos.

Se realizó un cribado adicional para eliminar contenido redundante o no centrado en la trazabilidad de las condiciones de producción en la cadena de suministro, quedando finalmente 5 artículos relevantes. De estos, solo uno proporcionó un análisis práctico de una aplicación probada en la explotación de Hermanos Olea Losa, S.L. en Zamora, España. Además, se identificaron dos artículos que abordaron el uso de blockchain en la trazabilidad de la cadena de suministro agroalimentario para cooperativas de frutas y hortalizas.

Este proceso detallado arrojó muy pocos resultados que permitieran identificar y analizar el grado de adopción y las aplicaciones específicas de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario de España, especialmente en cuanto a la trazabilidad y la certificación de las condiciones de producción.

Por eso, el análisis bibliográfico inicial fue revisado utilizando un repositorio alternativo a través de Google Scholar. Realizar una búsqueda alternativa en Google Scholar es pertinente por varias razones: en primer lugar, Google Scholar es un repositorio amplio que incluye una variedad de fuentes académicas y literatura "gris" que pueden no estar indexadas en bases de datos más especializadas como Scopus. Esto permite una perspectiva más inclusiva y diversa de la literatura disponible, lo que puede ser crucial para captar todas las investigaciones relevantes en un campo emergente como la tecnología blockchain en el sector agroalimentario

En esta segunda búsqueda, el filtrado de los resultados no se pudo reproducir con el mismo patrón de búsqueda debido a las limitaciones del repositorio, que no permiten la discriminación por áreas temáticas, aunque se utilizaron las mismas palabras clave. Debido a estas limitaciones, el filtrado de resultados relevantes se realizó analizando los resultados caso por caso. Además de la literatura "gris", se identificaron 5 nuevos artículos académicos.

La búsqueda en Google Scholar, realizada en enero de 2022, se centró en la identificación de artículos relacionados con la tecnología blockchain en el sector agroalimentario. Se utilizaron las palabras clave "Blockchain y alimentos o agricultura" para el período 2019-2022, obteniendo inicialmente 13,400 resultados, que luego se refinaron a 808 artículos revisados. Al incluir "España" en los términos de búsqueda, se redujeron a 284 artículos revisados. En la fase de cribado, se eliminaron aquellos artículos que no hacían referencia a la cadena de suministro y aquellos en los que blockchain se utilizaba solo para fines financieros. Finalmente, se eliminaron duplicados y artículos donde "España" o "blockchain" solo se mencionaban en las referencias, resultando en una selección final de 5 artículos adicionales relevantes para el análisis de la implementación de blockchain en la trazabilidad del sector agroalimentario español.

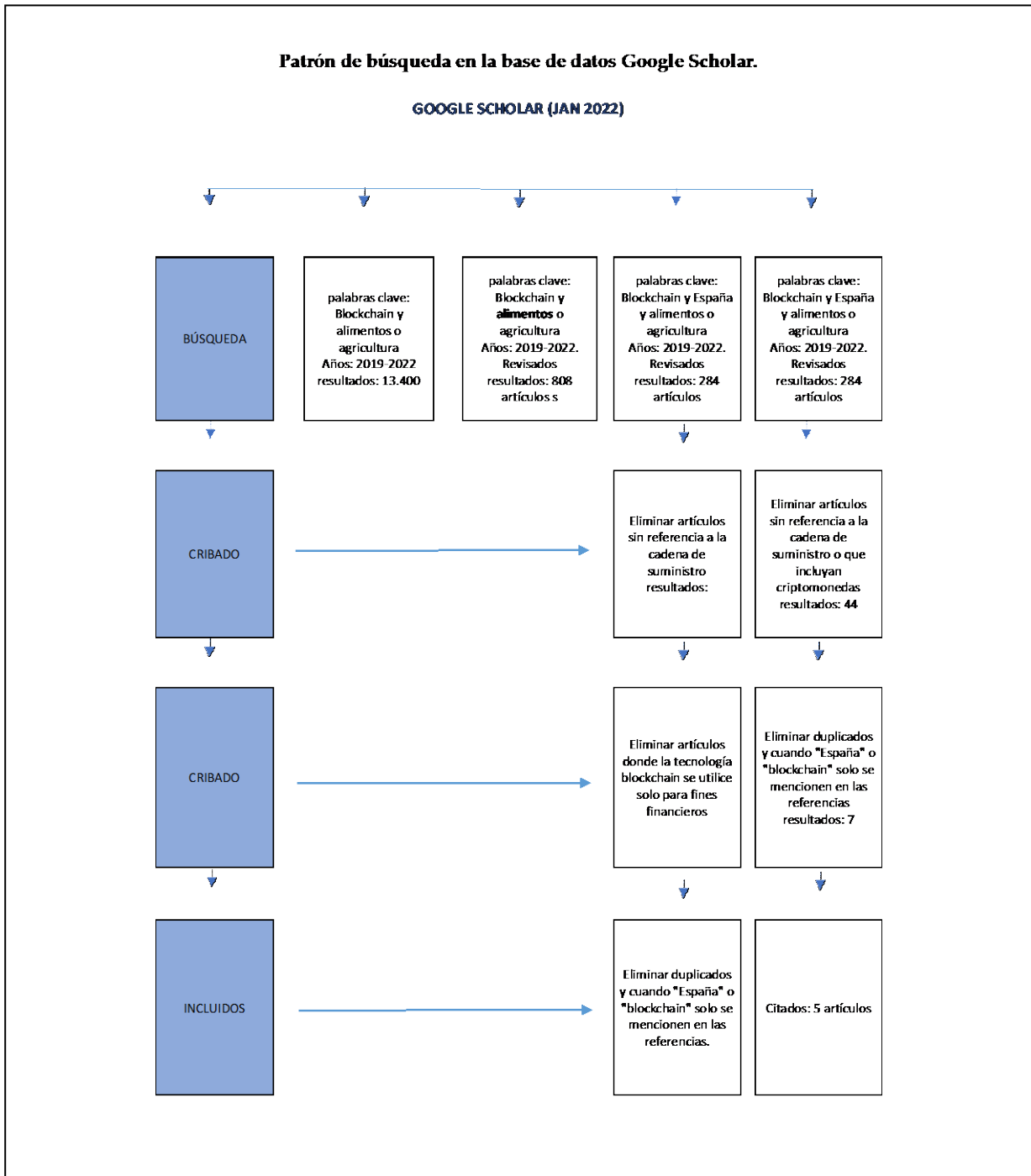


Fig.3.2 Patrón de Búsqueda y Proceso de Cribado en la Base de Datos Google Scholar de artículos sobre Blockchain en el Sector Agroalimentario en España (enero 2022)

Esta aproximación "mixta" al análisis bibliográfico se consideró inicialmente la más adecuada para obtener una perspectiva más realista sobre la incorporación de aplicaciones blockchain en la industria agroalimentaria española, debido a la escasez de artículos académicos que abordaran este tema específico en el país. El enfoque mixto incluyó tanto búsquedas en bases de datos académicas reconocidas como Scopus, como en repositorios alternativos y herramientas más accesibles como Google Scholar.

Además, durante el proceso de entrevistas, se identificaron nuevas fuentes bibliográficas españolas mencionadas por los agentes entrevistados, lo que llevó a una revisión adicional del análisis bibliográfico inicial. Se utilizaron repositorios alternativos a Scopus y se realizó una búsqueda exhaustiva en Google Scholar. Aunque inicialmente Google Scholar parecía ofrecer una mayor cantidad de referencias, al filtrar los resultados para incluir solo artículos revisados y analizar su contenido en profundidad, se encontró que el porcentaje de artículos útiles para el estudio era similar en ambas plataformas. No obstante, esta segunda búsqueda permitió identificar algunos artículos particularmente relevantes, que ofrecían estudios de caso en España o aportaban enfoques metodológicos específicos, como los trabajos de Romero-Frías et al. (2021) y Berneis (2021).

En esta fase de la investigación, también se integraron documentos proporcionados por los agentes entrevistados, que estaban disponibles en archivos académicos, pero no en internet. Estos incluían tesis de máster, como la de Jesús Alfonso & Muñoz Jiménez (2020), y artículos publicados en revistas divulgativas y guías. La revisión de la literatura se enriqueció además con publicaciones comerciales e informes obtenidos de las bases de datos y revistas del Ministerio de Agricultura español y sus organismos asociados. A lo largo de las entrevistas, surgieron nuevas referencias bibliográficas que se incorporaron al análisis.

A pesar de la amplitud de fuentes consultadas, se observó que la gran mayoría de los artículos no proporcionaban casos de aplicación concretos o información directamente relevante para el estudio, enfocándose principalmente en el uso de blockchain para certificar condiciones de producción en la cadena de suministro. Esta selección cuidadosa asegura que las referencias citadas sean directamente aplicables y relevantes para el objetivo del estudio.

3.1.2 Investigación de campo.

En la búsqueda de literatura científica encontramos que, aunque son muchos los ejemplos que encontramos en de la aplicación de blockchain a la cadena de suministro, son muy pocos aquellos ejemplos prácticos que analizan la integración de los datos de producción agraria como parte de la creación de valor.

Por eso la búsqueda bibliográfica se contrasta con una investigación dirigida a obtener dichos datos de las entrevistas realizadas a agentes relacionados con proyectos que han utilizado esta tecnología blockchain para certificar parámetros o dar garantías directamente ligadas con las condiciones de producción primaria: agricultura ecológica, origen, raza del animal o método y zona de captura pesquera.

A través de estas entrevistas semiestructuradas se contrasta, valida y amplía la información obtenida de la búsqueda bibliográfica relativa al uso actual de blockchain en España aplicado al suministro agroalimentario. Asimismo, se quiere identificar y analizar un número suficientemente significativo de casos de uso.

A partir de los antecedentes proporcionados por la revisión de la literatura, el documento ha utilizado entrevistas semiestructuradas para contrastar, completar y validar la información sobre el uso actual de blockchain en España aplicado a la cadena de valor del suministro agroalimentario. Este enfoque metodológico es similar a otros encontrados en la literatura al investigar la introducción de nuevas aplicaciones tecnológicas (Patelli & Mandrioli, 2020), y las entrevistas semiestructuradas generalmente se consideran una herramienta efectiva para explorar las opiniones de los encuestados y recopilar datos en profundidad sobre problemas complejos (Nienaber et al., 2021). De hecho, este método se ha utilizado recientemente en artículos que se centran en la creación de valor de la cadena alimentaria y en las actitudes y toma de decisiones de los agricultores y otros interesados vinculados a problemas agrícolas (Chang et al., 2020); (Q. K. Nguyen, 2016). Estas entrevistas semiestructuradas se consideran una herramienta eficaz para explorar las opiniones de los encuestados y recopilar datos en profundidad sobre cuestiones complejas (Nienaber, Woodcock y Liotopoulos, 2020). Este método se ha utilizado recientemente en artículos que se centran en la creación de valor de la cadena alimentaria y blockchain y también se ha utilizado para investigar las actitudes y la toma de decisiones de los agricultores y otras partes interesadas asociadas con problemas agrícolas (por ejemplo, ver Lamprinopoulou et al., 2014; Nguyen et al., 2016; Oliveira et al., 2013 (Sheila Barry & Sheila Barry, 2021). El proceso de selección de las partes interesadas relevantes incluirá una representación de los “eslabones” relevantes de la cadena de suministro y también de los agentes “impulsores” como serían los proveedores de aplicaciones tecnológicas de blockchain, agentes reguladores y sector académico en el ámbito de las nuevas tecnologías aplicadas a la trazabilidad (Sheila Barry & Sheila Barry, 2021)

En cuanto a la selección de la muestra, las entrevistas se lanzarán a agentes que se irán identificando progresivamente utilizando la experiencia y conexiones de los autores, como se indicará más adelante.

Plan de encuesta:

Para elaborar del cuestionario se han tomado como referencia modelos de encuestas similares (Mark Easterby-Smith, Richard Thorpe, Paul Jackson, Andy Lowe, 2008) Nienaber et al., 2021; Petersson, 2005) que se adaptaron al campo agroalimentario. Aunque estas encuestas ya proporcionaban un conjunto adecuado de preguntas relevantes para esta investigación, el contenido de la encuesta se completó con brechas identificadas en la revisión de la literatura (ver Sección 3.1), y se modificó dependiendo de si los agentes estaban directamente involucrados en la cadena de suministro o pertenecían al grupo de facilitadores (es decir, proveedores de soluciones tecnológicas al sector público, ver Figura 3.1). Los cuestionarios utilizados se recogen en el Anexo C y se dirigieron a agentes de empresas privadas, del sector público y académico. La entrevista comenzó delineando los objetivos de la encuesta, quiénes serían los encuestados y por qué la encuesta era importante. El tiempo para completar la entrevista se estimaba en dos horas. Sin embargo, debido a la experiencia de los encuestados, a menudo requirió más tiempo para permitir la posibilidad de obtener más información sobre los proyectos y las opiniones de los expertos. Las preguntas están estructuradas para capturar una amplia gama de información, desde la percepción general y el conocimiento de la tecnología hasta detalles específicos de la implementación y los desafíos enfrentados. Esto permite una visión integral de cómo se percibe y utiliza la tecnología blockchain en diferentes niveles y sectores.

Características de los Cuestionarios:

Información Básica: Los cuestionarios comienzan con preguntas de identificación básicas como la fecha de la entrevista, el nombre del entrevistado, la compañía, el departamento, la posición y los años de experiencia. Cuentan con una parte introductoria común y una parte más específica que diferencia empresas del sector público y académico, ya que se incluyen algunas preguntas especialment dirigidas a estos colectivos.

La encuesta, por tanto, se estructura de la siguiente manera:

Parte A: Introducción:

Esta sección explica el propósito de la investigación, que es analizar el conocimiento y la percepción de la tecnología blockchain en España, específicamente en la cadena agroalimentaria.

Se asegura la confidencialidad de la información proporcionada, indicando que los datos serán utilizados de manera agregada y no se compartirán con terceros.

Parte B: Guía de Entrevista para Empresas:

Preguntas Generales: Incluyen preguntas sobre el puesto del entrevistado, la naturaleza del negocio de la empresa y su papel en la cadena de suministro agroalimentario.

Forma Actual de Trabajar: Se exploran los desafíos actuales en la cadena de suministro y cómo la tecnología blockchain podría mejorar la situación.

Documentación y Comunicación: Preguntas sobre la documentación requerida, el proceso de comunicación y la colaboración entre actores de la cadena.

Incorporación de Tecnologías de la Información: Se evalúa el panorama actual de las tecnologías de la información en la empresa y su suficiencia.

Estandarización: Preguntas sobre el conocimiento y la participación en procesos de estandarización.

Conocimiento e Interés sobre Blockchain: Incluye preguntas sobre el conocimiento y las aplicaciones de blockchain, las oportunidades y desafíos percibidos, y la participación en proyectos de blockchain.

Parte C: Guía de Entrevista para Agentes del Sector Público/Academia:

Similar a la Parte B, pero enfocada en el conocimiento académico y gubernamental sobre blockchain, su utilidad y los desafíos percibidos en su implementación en la cadena de suministro agroalimentario.

A partir de las entrevistas, se identificaron otros interesados relevantes y se incluyeron en la encuesta.

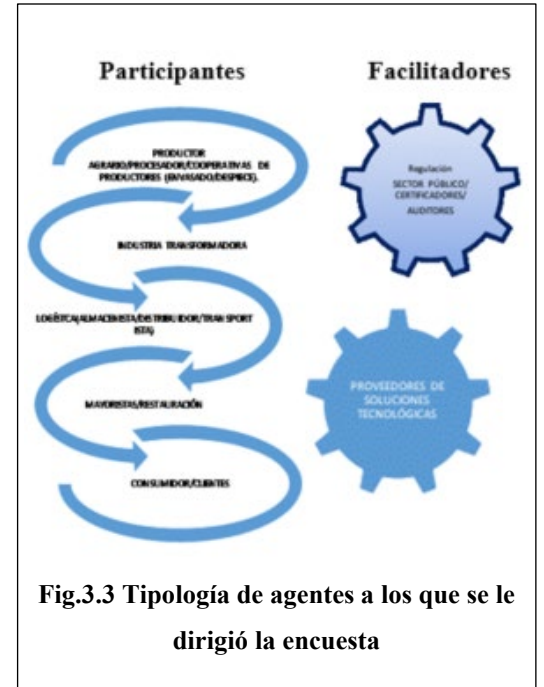
Este muestreo de bola de nieve no es un método de muestreo aleatorio para seleccionar encuestados, por lo que conlleva el riesgo de sesgar la muestra. Sin embargo, los resultados siguen siendo representativos de la población debido al número limitado de proyectos y expertos. Hasta donde saben los autores, y en el momento de escribir el artículo, la gran mayoría, si no todos, de los proyectos en España que utilizaron blockchain para condiciones de producción en la industria agroalimentaria estaban incluidos. Para asegurar que los encuestados se sintieran cómodos y seguros al compartir sus opiniones, se garantizó su anonimato.

Selección de encuestados

La población objetivo de la encuesta estuvo compuesta por partes interesadas relevantes con un conocimiento profundo de la tecnología blockchain y sus aplicaciones en la industria agroalimentaria, especialmente en los ámbitos de producción y certificación. Este grupo incluye proveedores de aplicaciones tecnológicas de blockchain, autoridades regulatorias y expertos académicos especializados en nuevas tecnologías aplicadas a la trazabilidad agroalimentaria.

Esta elección se ha inspirado en otras equivalentes que se han realizado en estudios previos que utilizaron entrevistas semiestructuradas con representantes de estos grupos para investigar factores cualitativos, como los que promueven la transparencia y el valor agregado a lo largo de la cadena de suministro de alimentos (Stranieri et al., 2021; Barry, 2021).

Además, este estudio se centró en examinar los factores que impulsan la adopción de blockchain en casos que integran condiciones de producción agrícola, así como la influencia del financiamiento externo en la toma de decisiones.



3.2 Metodología empleada en la identificación de las limitaciones técnicas y en la arquitectura de sistemas con base en blockchain.

Después de la fase 3.1 que aborda el análisis del despliegue de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario español para la certificación de condiciones de producción de alimentos, se inicia una segunda fase orientada a identificar las limitaciones técnicas y proponer mejoras en la arquitectura de sistemas. Identificar estas limitaciones desde el principio es fundamental para poder abordarlas de manera proactiva y desarrollar propuestas de mejora en la arquitectura, resolviendo los desafíos específicos que presentan las aplicaciones que se están utilizando para

certificar condiciones de producción primaria en el sector agroalimentario español. Esto puede implicar ajustes en el diseño de la red blockchain, la selección de protocolos de consenso, la integración con sistemas existentes, entre otros aspectos técnicos.

En resumen, la fase 3.2 permite abordar de manera proactiva las limitaciones técnicas que pueden surgir durante la implementación de tecnologías blockchain. Con base en el examen de los casos identificados en España, se ha podido hacer una evaluación de los problemas que presentaban los casos de uso analizados en el sector agroalimentario español, como escalabilidad, interoperabilidad, seguridad, costos, entre otros. Sin embargo, es preciso cotejar estos primeros datos con un estudio bibliográfico general para comprender las barreras que enfrenta la implementación de blockchain y encontrar soluciones cómo que pueden optimizar el diseño de estas aplicaciones dirigidas al sector primario. A diferencia de la fase anterior, el enfoque no será territorial. En su lugar, una vez identificados los sistemas utilizados en los casos analizados e implementados en España (sistemas permissionados programados en lenguajes como Solidity en Ethereum, Chaincode en Hyperledger Fabric, y DAML en Corda para el desarrollo de contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas - dApps), la investigación se centrará en el análisis tecnológico de estas arquitecturas a través de una revisión sistemática de la literatura, con el objetivo de analizar las investigaciones académicas más recientes sobre la evaluación de estos sistemas blockchain.

La planificación de la revisión está dirigida a sistematizar la evaluación de soluciones tecnológicas comerciales basadas en blockchain aplicadas al sector agroalimentario para certificar las condiciones de producción, por tanto, es preciso identificar estudios previos sobre este tema, pero también analizar los parámetros utilizados para evaluar los modelos de confianza existentes. El propósito de la revisión es conocer el estado de las aplicaciones de tecnología blockchain en la acreditación de condiciones de producción agrícola desde 2019, utilizando un estudio terciario para revisar artículos relacionados con el análisis de arquitectura blockchain.

El principal método de síntesis es una Revisión Sistemática de la Literatura (SLR), ya que "Proporciona los medios por los cuales la mejor evidencia actual de la investigación puede integrarse con la experiencia práctica en el proceso de toma de decisiones con respecto al desarrollo y mantenimiento de software." (Dybå & Dingsøy, 2008). En este contexto, la evidencia se define como una "síntesis" de estudios científicos de mejor calidad sobre un tema o pregunta de investigación específicos. Varios autores (Sunny et al., 2020a) (Marchesi et al., 2022b) ya han estudiado el diseño de soluciones de trazabilidad basadas en blockchain con base en esa misma metodología. Cada caso de uso se revisa para comprender el propósito de la trazabilidad basada en blockchain en diversos contextos, limitaciones y ventajas, y la metodología seguida para desarrollar la solución.

Por tanto, basándose en estos estudios previos, este apartado de la tesis lleva a cabo una revisión de los conceptos publicados sobre sistemas tecnológicos basados en blockchain, señalando para la certificación de condiciones de producción primaria, la identificación de partes cruciales o vulnerables en un sistema de arquitectura blockchain con especial atención a la gestión de datos: recolección y manejo de datos.

Para abordar este estudio se han utilizado las pautas proporcionadas por Kitchenham y Charters para desarrollar la metodología de análisis de necesidades y plan de revisión (Kitchenham, s.f.). El enfoque sistemático propuesto por estos autores incluye preguntas de investigación, fuentes de datos utilizadas para recuperar artículos, estrategia de búsqueda, criterios de inclusión y exclusión, y selección y evaluación final.

Como primer paso, se llevó a cabo una revisión de la literatura especializada basada en las tres preguntas de investigación definidas previamente, como han utilizado otros autores en trabajos de investigación equivalentes (Shuaib et al., 2022).

La revisión se enfoca en analizar artículos que aborden la gestión de la información y los datos en la arquitectura de sistemas blockchain, destacando aquellos aspectos que deben ser divulgados por los operadores para garantizar un nivel adecuado de confianza en la arquitectura blockchain. Así, esta revisión de la literatura identificará las características esenciales de los datos necesarios y ofrecerá recomendaciones para la arquitectura de datos más adecuada para su aplicación. Además, la investigación también tiene como objetivo compilar y generar ideas sobre cómo el sistema de información para las autoridades públicas en Europa podría contribuir al diseño y construcción de una arquitectura de datos más completa en aplicaciones de sistemas blockchain. Para ello, se realiza un estudio legal que busca identificar acciones que puedan ser implementadas o integradas con los controles públicos aplicados a los sistemas.

Este enfoque sistemático incluye la formulación de preguntas de investigación, la identificación de fuentes de datos, el diseño de estrategias de búsqueda, la aplicación de criterios de inclusión y exclusión, y la evaluación final de los resultados.

3.2.1 Preguntas de Investigación

Las preguntas de investigación deben ser las adecuadas para evaluar el éxito del proyecto de tecnología blockchain en la conexión entre las características físicas de las condiciones de producción primaria y su reflejo en el producto que llega al consumidor, con el contenido digital almacenado en la blockchain.

La revisión se organiza en torno a tres temas principales:

Comparación de aplicaciones basadas en blockchain en el sector agroalimentario:

La primera pregunta de investigación busca documentos que aborden la comparación de aplicaciones basadas en blockchain utilizadas en los sectores agroalimentarios. ¿Cómo llevar a cabo un estudio comparativo de aplicaciones basadas en blockchain permitidas en el sector agroalimentario?

Factores de riesgo asociados con la tecnología blockchain permitida respecto a la precisión de los datos:

La segunda pregunta de investigación explora los factores de riesgo relacionados con la precisión de los datos en la tecnología blockchain permitida en el sector agroalimentario. ¿Qué características deben considerarse para comparar y elegir una aplicación de blockchain sobre otra en el sector agroalimentario? (Características para comparar la tecnología de blockchain permitida en el sector agroalimentario en cuanto a la precisión de los datos).

Evaluaciones de diferentes factores de riesgo en arquitecturas de blockchain permitidas relacionadas con la recopilación y manejo de datos:

La tercera pregunta de investigación se compone de una serie de preguntas que evalúan los diferentes factores de riesgo en arquitecturas de blockchain permitidas, relacionadas con la recopilación de datos. Factores relacionados con el método de recopilación de datos: pertinencia e integridad. ("precisión de los datos, selección de datos y blockchain permitida en el sector agroalimentario"). Factores relacionados con el manejo de datos: seguridad, transparencia y mecanismos de verificación. ("datos, seguridad, transparencia, verificación, blockchain permitida en el sector agroalimentario").

3.2.2 Proceso de Búsqueda.

El proceso de búsqueda se llevó a cabo manualmente a través de bases de datos científicas específicas, actas de conferencias y artículos de revistas publicados a partir de 2019. Para mitigar el sesgo, se contactó directamente con investigadores relevantes y se revisaron resúmenes de conferencias relacionadas con el tema. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión estrictos para garantizar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados.

Las fuentes consultadas incluyen Science Direct y actas de conferencias, con un enfoque en artículos publicados entre 2019 y 2023. Los artículos se clasificaron según el tema de investigación, el año de publicación y el tipo de análisis.

Criterios de inclusión: Se seleccionaron artículos publicados desde el 1 de enero de 2019 hasta el 30 de mayo de 2023, abarcando temas como "Revisiones Sistemáticas de la Literatura" (SLRs), revisiones bibliográficas con preguntas de investigación definidas que evalúen el éxito de la tecnología, extracción de datos, presentación de datos y metaanálisis relacionados con este tema.

Criterios de exclusión: Se excluyeron documentos que fueran revisiones bibliográficas informales (sin preguntas de investigación definidas, proceso de búsqueda, extracción de datos o análisis de datos claramente definidos), documentos que no estuvieran sujetos a revisión por pares, documentos que abordaran aspectos sociales no relacionados con problemas tecnológicos o con el uso de la cadena de suministro de blockchain, y artículos que presentaran duplicidades.

Colección de artículos:

Sobre la recopilación de artículos se realizó la siguiente clasificación:

La fuente (es decir, base de datos, conferencia o revista).

El año en que se publicó el artículo.

Tipo de artículo:

(A) Alcance General (incluidas Revisiones Sistemáticas de la Literatura).

(B) Metaanálisis o identificación de factores de riesgo en general.

(C) Factores de riesgo específicos en arquitecturas de blockchain permissionadas relacionados con la recopilación de datos.

El autor(es).

Problema de investigación.

Puntuación de calidad para el estudio (número de citas).

SOURCE	Resultado la búsqueda (Número de artículos por año y fuente)			
	2019	2020	2021	2022-2023
(Pregunta1) Science Direct	3	5	2	6
(Pregunta 2) Science Direct	0	3	3	0
(Pregunta 3.1) Science Direct	3	5	3	10
(Pregunta 3.2) Science Direct	9	11	7	39
Conference Abstracts.			1	2

Tabla. 3.2 Resultado de la búsqueda de artículos sobre la implementación de sistemas blockchain.

De la búsqueda bibliográfica realizada en Science Direct, se destacan los artículos relevantes en el campo de la tecnología blockchain aplicada al sector agroalimentario. La relevancia de cada artículo se mide por el número de citas y lectores, lo que refleja su impacto e influencia en la comunidad científica. Por ejemplo, el estudio de Zhao et al. (2019) en "Computers in Industry" es altamente citado y leído, indicando su importancia en la gestión de la cadena de valor agroalimentaria mediante blockchain. Otros artículos, como el de Marchesi et al. (2022), presentan arquitecturas industriales de blockchain, mientras que Zhang et al. (2022) se enfoca en factores críticos de éxito para implementar blockchain en cadenas de suministro sostenibles. Estudios como el de Mistry et al. (2020) exploran el uso de blockchain para IoT en la automatización industrial, mostrando alta relevancia con numerosas citas.

Como se ha indicado anteriormente, se clasifican los artículos en tres categorías: A (Alcance General), B (Metaanálisis o Identificación de Factores de Riesgo) y C (Estudios Específicos), cubriendo desde revisiones sistemáticas hasta casos específicos, lo que ha permitido acometer una visión integral de las aplicaciones y desafíos de blockchain en este sector.

La relación detallada de artículos se recoge en el Anexo A.

3.2.3 Estudio Legal

Para complementar la revisión técnica, se realizó un estudio legal dirigido a identificar disposiciones obligatorias que establecen bases de datos oficiales o recopilación de datos y que están sometidos a control, de manera que podrían utilizarse para validar soluciones que utilicen esos mismos datos en la construcción de sistemas.

Para desarrollar esta búsqueda, se utilizaron búsquedas previas ya realizadas en estudios anteriores (Martínez-Castañeda & Feijoo, 2023). La recopilación de regulaciones seleccionadas ha

sido contrastada y actualizada utilizando varios repositorios de datos legales: El protocolo de búsqueda seguido fue el siguiente:

- Alcance de la búsqueda: disposiciones obligatorias que establecen bases de datos oficiales o recopilación de datos.
- Jurisdicción en la que se llevará a cabo la búsqueda y tipo de gobierno u otra entidad con autoridad sobre las bases de datos oficiales o la recopilación de datos: Disposiciones alimentarias y agrícolas en la región geográfica europea.
- Repositorios legales: BOE y VLex.
- Palabras clave relevantes: registro, lista de bases de datos, disposiciones regulatorias de alimentos y agricultura. El repositorio de VLex ofrece una recopilación de disposiciones sobre control y disposiciones relacionadas con la política agrícola común.

El resultado de la búsqueda se presenta en el Anexo B.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Resultados extraídos en la primera fase del estudio: análisis del despliegue de Tecnologías Blockchain en España

Como se ha señalado anteriormente El objetivo principal de este apartado es evaluar la implementación de la tecnología blockchain en la certificación de las condiciones de producción de alimentos dentro del sector agroalimentario español. Para alcanzar este objetivo, se ha adoptado una metodología mixta que combina tanto la investigación documental como el trabajo de campo.

Resumiendo, la metodología anteriormente expuesta: se ha realizado una revisión exhaustiva de la literatura existente, abarcando artículos académicos y diversos informes de empresas que han explorado o implementado soluciones blockchain en este contexto. Esta fase documental fue fundamental para establecer un marco teórico y contextualizar el uso de blockchain en la trazabilidad y certificación de productos agroalimentarios. Posteriormente, se realizó un trabajo de campo a través de encuestas semiestructuradas dirigidas a expertos del sector. La técnica de "bola de nieve" se empleó para identificar y contactar a estos expertos, permitiendo así una muestra más representativa y rica en diversidad de perspectivas. Este enfoque permitió obtener información detallada y práctica sobre las experiencias, desafíos y oportunidades asociados con la adopción de blockchain en la industria agroalimentaria española.4.1.1 Investigación documental.

4.1.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica.

La búsqueda combinada en Scopus y Google Scholar permitió hacer un cribado general de los artículos científicos que habían analizado las aplicaciones y desafíos de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario español. Esta revisión, que incluyó tanto literatura académica formal como literatura gris, ha servido de punto de partida para comprender el estado actual y el potencial futuro de blockchain en la certificación de condiciones de producción y trazabilidad de alimentos en España.

Se constata que en España ha habido algunas contribuciones a la literatura, principalmente teóricas, centradas en temas de trazabilidad alimentaria (Mirabelli & Solina, 2020). Sin embargo, la literatura científica existente aún no ha respondido a la pregunta sobre la situación de la implementación de esta tecnología en España, qué desafíos enfrenta y, específicamente, su papel en garantizar las condiciones de producción de alimentos en toda esta misma cadena de suministro. Asimismo, tanto desde el estudio bibliográfico en España como desde el llevado a cabo a nivel internacional, apenas hay información científica sobre políticas públicas y el uso de mecanismos de financiación públicos o público-privados para contribuir a la implementación y adopción de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario y por ello, tal y como se describió en el apartado anterior, ha sido necesario complementar esta búsqueda por la escasez de artículos científicos que hacían referencia a proyectos implementados en España.

Durante el proceso de búsqueda y cribado en las bases de datos Scopus y Google Scholar, se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura para identificar artículos sobre la aplicación de la tecnología blockchain en el sector agroalimentario español. En enero de 2022, la búsqueda inicial en Scopus utilizando las palabras clave "Blockchain" y "alimentos" o "agricultura", restringida al período 2019-2022, arrojó un total de 818 artículos. Posteriormente, al aplicar un filtro para limitar los resultados a las áreas temáticas de "Ingeniería" (ENGI) y "Agricultura" (AGRI), el número de artículos se redujo a 307. Para enfocar aún más la búsqueda, se seleccionaron únicamente artículos publicados por autores en España, resultando en 7 artículos. Tras un cribado adicional para eliminar contenido no relevante o no centrado en la trazabilidad de las condiciones de producción en la cadena de suministro, se identificaron finalmente 5 artículos relevantes. De estos, solo uno proporcionó un análisis práctico de una aplicación de blockchain en la explotación de Hermanos Olea Losa, S.L. en Zamora, España. Además, se encontraron dos artículos que abordaron el uso de blockchain en la trazabilidad de la cadena de suministro agroalimentario para cooperativas de frutas y hortalizas.

En paralelo, se realizó una búsqueda alternativa en Google Scholar para complementar los resultados obtenidos en Scopus. Google Scholar, al ser un repositorio amplio que incluye tanto fuentes académicas como literatura "gris", permitió una perspectiva más inclusiva y diversa de la literatura disponible. En esta búsqueda, también centrada en el período 2019-2022 con las palabras clave "Blockchain y alimentos o agricultura", se obtuvieron inicialmente 13,400 resultados, que luego se refinaron a 808 artículos revisados. Al incluir "España" en los términos de búsqueda, el número de artículos se redujo a 284. Tras un filtrado adicional, que eliminó artículos sin referencia a la cadena de suministro o que mencionaban blockchain únicamente para fines financieros, la selección final consistió en 5 artículos adicionales relevantes para el análisis.

La relevancia y el impacto de los artículos se midieron mediante el número de citas y lectores. El artículo de Zhao et al. (2019) en *Computers in Industry* se presenta como el artículo más citado, con 304 citas y 1052 lectores, reflejando su importancia como referencia de aplicación a la gestión de la cadena de valor agroalimentaria mediante blockchain. Por otro lado, el estudio de Mistry et al. (2020) en *Mechanical System and Signal Processing* es el más relevante, con 328 citas y 766 lectores en la aplicación de blockchain para IoT en la automatización industrial.

No obstante, de los artículos seleccionados, se buscaban aquellos que presentaban estudios de caso específicos en España, así como enfoques metodológicos para la evaluación y aplicación de blockchain en la trazabilidad de alimentos. En total, se identificaron 10 artículos relevantes (5 de Scopus y 5 de Google Scholar). La distribución temporal de estos artículos mostró un interés creciente en la tecnología blockchain en el sector agroalimentario: dos artículos fueron publicados en 2019, tres en 2020, tres en 2021 y dos en 2022.

En cuanto a la investigación sobre aplicaciones, en España ha habido algunas contribuciones a la literatura, principalmente teóricas, centradas en temas de trazabilidad alimentaria (Mirabelli & Solina, 2020) y a través de artículos de la literatura “gris” se identificaron 5 de los proyectos a los que pudo darse seguimiento y que se incluyen en la tabla D.6.

El apartado primero, que hacía referencia al estado del arte indicaba el incremento de uso de la tecnología blockchain para la industria agroalimentaria a partir de 2019 y la primera mitad de 2020 y al desarrollo de aplicaciones basadas en sistemas de blockchain permissionados que dieron lugar a nuevas generaciones de sistemas de Tecnologías de Registro Distribuido (DLTs).

Se observa también como la producción científica internacional sobre soluciones genéricas de blockchain para la industria agroalimentaria está cambiando rápidamente. Se constata en 2021, una tendencia decreciente en el número total de artículos dedicados a blockchain en general (aún demasiado temprano para ser constatada) pero se evidencia como a la vez se incrementa el número de artículos que presentan soluciones tecnológicas basadas en diferentes DLTs (Hyperledger, R3, IBM Blockchain, Ethereum o Stellar) (sistemas permissionados) dirigidos a garantizar la trazabilidad de la cadena de suministro.

Si bien los artículos que se refieren a las aplicaciones prácticas del uso de esta tecnología destinadas a garantizar las condiciones de producción primaria a menudo evidencian como esos proyectos no se implementan más allá de un proyecto piloto o han durado solo un número muy limitado de pruebas. Varios autores coinciden en las limitaciones de las soluciones existentes en términos del número de transacciones por segundo y la escalabilidad (Romero-Frías et al., 2021) (Srivastava & Dashora, 2022).

La producción científica internacional sobre soluciones genéricas de blockchain para la industria agroalimentaria muestra una nueva línea de estudios que presentan soluciones tecnológicas basadas en diferentes DLTs (Hyperledger, R3, IBM Blockchain, Ethereum o Stellar) para garantizar la trazabilidad de la cadena de suministro, de los estudios analizados se puede constatar que estas soluciones tecnológicas son las que están utilizando también en España, con lo que parece que la tecnología está plenamente incorporada en nuestro país, aunque el despliegue parece limitado.

La literatura científica existente aún no permite, por tanto, dar respuesta a la pregunta sobre la situación de la implementación de la tecnología blockchain en España, qué desafíos enfrenta y su papel en garantizar las condiciones de producción de alimentos en toda la cadena de suministro. Tanto desde el estudio bibliográfico en España como a nivel internacional, apenas hay información científica sobre políticas públicas y el uso de mecanismos de financiación públicos o público-privados para contribuir a la implementación y adopción de tecnologías blockchain en el sector agroalimentario.

4.1.2 Resultados del Trabajo de campo

Como se mencionó en el apartado anterior, entre el 15 de diciembre de 2021 y el 15 de febrero de 2022 se realizaron una serie de entrevistas utilizando cuestionarios estructurados. Estas entrevistas tuvieron como objetivo sistematizar la recolección de datos sobre el interés y el conocimiento acerca de la tecnología blockchain, así como sobre los beneficios y limitaciones percibidos y las experiencias prácticas con esta tecnología en la cadena de suministro agroalimentario. Además, se exploraron posibles barreras para la adopción de blockchain y se identificaron oportunidades para la digitalización y estandarización en el sector.

Selección de encuestados:

La selección de encuestados comenzó con un mapeo de los agentes identificados a partir de una revisión de la literatura, revistas especializadas, y directorios y agendas de la administración pública y universidades. Utilizando el registro de transparencia de la Comisión Europea, se identificó una segunda serie de agentes trabajando con soluciones blockchain en España (ver Tabla D.3 en el Anexo D). A partir de estos, se empleó la técnica de muestreo de “bola de nieve”, donde los mismos encuestados ayudaron a identificar una capa adicional de partes interesadas.

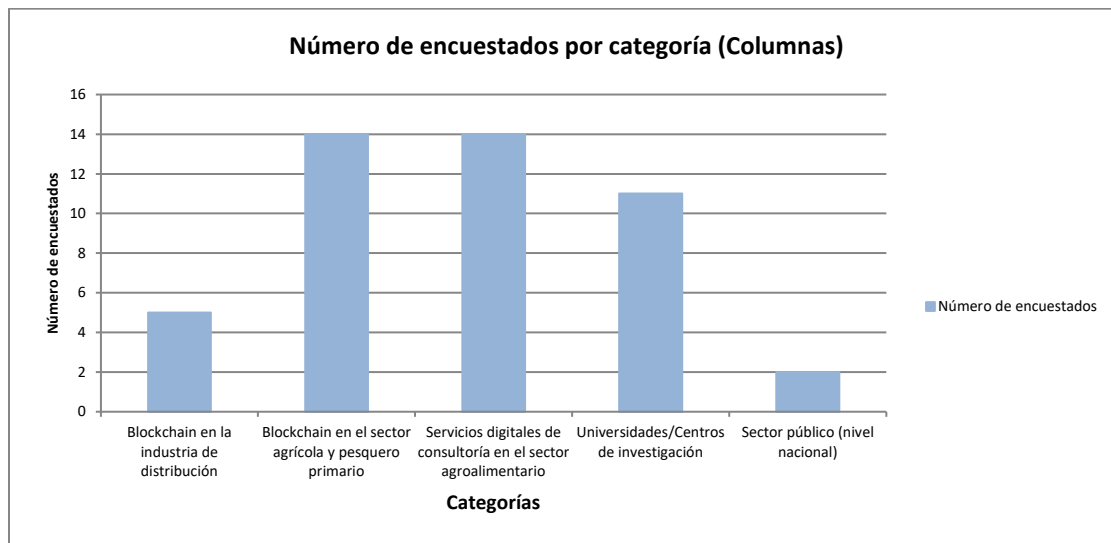


Fig.4.1 Clasificación de los expertos encuestados por categorías profesionales.

Proceso:

En la primera fase de la investigación, se realizaron 14 entrevistas con expertos de cinco áreas clave de la cadena logística, logrando un 23 por ciento de respuestas válidas. Esto incluyó representantes de proveedores de soluciones tecnológicas y de la administración pública. En la segunda etapa, se realizaron otras seis entrevistas basadas en recomendaciones, con un 60 por ciento de respuestas válidas. Además del muestreo de bola de nieve, se realizaron contactos directos a través de la red social LinkedIn. En total, se contactó a más de 60 expertos, se solicitó entrevista a 46 y finalmente se entrevistó a 23 (las referencias de los encuestados se encuentran en la Tabla D. 4 en el Anexo D). La encuesta se llevó a cabo durante un período de dos meses, del 15 de diciembre de 2021 al 15 de febrero de 2022.

De los 46 agentes contactados, sólo se consideraron válidas 19 entrevistas. Se descartaron 24 contactos por falta de respuesta, derivación a especialistas que nunca respondieron, o porque los entrevistados indicaron no poder proporcionar detalles profundos sobre el funcionamiento del sistema. Otro motivo para descartar algunas entrevistas fue la identificación de proyectos etiquetados como blockchain que, en realidad, no utilizaban esta tecnología. A pesar de organizar la información como un sistema de registro o base de datos distribuida, estos sistemas no presentaban las características mínimas comunes a blockchain, como una base de datos distribuida compartida y consensuada en una red de igual a igual, con una secuencia de bloques enlazados que contienen una marca de tiempo y transacciones aseguradas por una clave criptográfica (Kramer et al., 2021; Romero-Frías et al., 2021). Por tanto, estos casos no se incluyeron en el análisis final, ya que no cumplían con las definiciones ontológicas o taxonómicas

de blockchain según autores de referencia (Rauchs, 2019). “una base de datos distribuida, que se comparte y acuerda en una red de igual a igual que consiste en una secuencia de bloques enlazados, que contiene una marca de tiempo (por ejemplo) y transacciones aseguradas por una clave criptográfica verificada” (Kramer et al., 2021) (Romero-Frías et al., 2021).

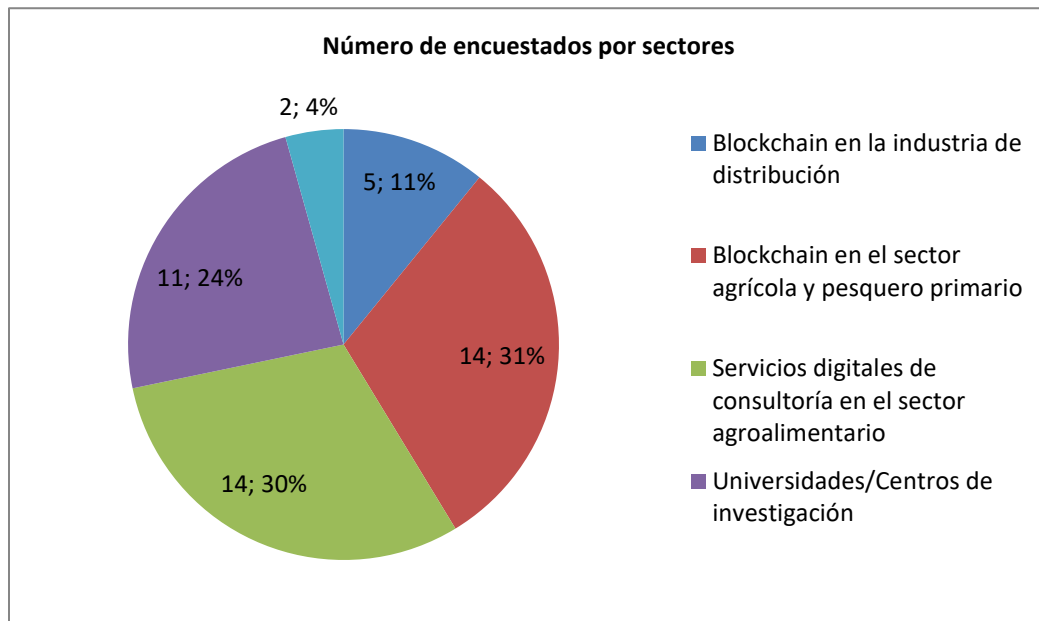


Fig.4.2 Clasificación de los expertos encuestados por sectores económicos.

Recopilación de datos:

Los datos recopilados de las entrevistas fueron analizados sistemáticamente utilizando un procedimiento temático basado en Nowell et al. (2017): transcripción, análisis, organización de datos, relevancia y agregación con respecto a las preguntas de investigación. Por lo tanto, cuando una opinión solo era relevante para uno de los individuos entrevistados, o cuando las implicaciones no iban en la misma dirección, el resultado no se consideraba.

El estudio bibliográfico y las entrevistas realizadas permitieron identificar una muestra significativa de proyectos, los cuales fueron analizados como estudios de caso concretos sobre la implementación de sistemas blockchain en el sector agroalimentario español, con un enfoque particular en la inclusión de datos de producción primaria.

Estos ejemplos, detallados en la Tabla 4.1 que se muestra a continuación, fueron seleccionados tanto a partir de la literatura existente (5 proyectos) como de las referencias citadas por los agentes entrevistados (12 proyectos). La combinación de estas fuentes de información

proporcionó una visión integral de cómo se está utilizando la tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a lo largo de la cadena de suministro, permitiendo una evaluación detallada de las prácticas y resultados obtenidos en distintos contextos.

EMPRESA	PROYECTO	INDUSTRIA	UTILIDAD	GRADO DE IMPLEMENTACIÓN	VERIFICADO	DESARROLLADOR	INFORMACIÓN WEB
Nutrasing	varios (Frambuesa)	hortofrutícola	proceso regulatorio digital seguro	piloto	no	FOOD TRACK	nutrasign
Fish world track	fish world track	pesca	origen, condiciones de pesca y trazabilidad del lote después de la subasta	en producción	si	META	https://fishworldtrack.com/
Cofradía Puerto de Celeiro	“Merluza de pincho”	pesca	gestión de almacenamiento y registros	Implementado pero abandonado después del final del financiamiento.	si	Food Trust (IBM)	carrefour lanza el primer blockchain de pescado fresco - detalle nota de prensa - carrefour España
Navidul	Navidul pork	cárnico	gestión de almacenamiento y registros	piloto	no	Food Trust (IBM)	https://www.interestempresas.net/industria-carnica/articulos/313905-navidul-pionera-en-la-implantacion-de-blockchain-en-jamon-iberico.html
ITCL technologic centre	Agraria	hortofrutícola	aplicar inteligencia artificial a toda la cadena de valor	conceptualización	si	Alastria	https://itcl.es/en/itcl-about-us/

covap	iberchain	cárnico	certificar la carne ibérica y mejorar la trazabilidad del 100% del cerdo ibérico	piloto	no	Alastria	https://static.ovap.es/notas-prensa/2021/n-p-el-iberico-100-entra-en-el-blockchain.pdf
Oleoestepa	Oil quatity	aceite de oliva	origen, parcelas de producción, tiempo de entrega y lotes.	piloto	si	Alastria	https://www.oleoestepa.com/aceite-de-calidad/produccion-sostenible/
Inmaculada san feliu	Traceability of citrus	hortofrutícola	origen	sin información (comenzando en 2019)	no		
Unica	Traceability of citrus	hortofrutícola	trazabilidad para exportación	sin información (comenzando en 2019)	no	Sistema informático de trazabilidad citrícola (SITC)	https://www.agritotal.com/nota/40637-citricos-el-sitc-ahora-incorpora-la-tecnologia-blockchain/
CTIC	dopchain	Varios (DOP)	autenticidad	en proyecto	no	solution dopchain (basado en Ethereum) Alastria	https://www.fundacionctic.org/es/proyectos/dopchain-solucion-basada-en-tecnologias-blockchain-para-la-trazabilidad-de-productos-de
Universidad de Córdoba and Fedacova.	Carne de ternera	cárnico	certificar las condiciones de producción desde la granja hasta la mesa	en proyecto	no	IBM	https://www.iof2020.eu/trials/cárnico/iot-and-blockchain-for-beef-supply-chain
Fundación Patrimonio Olivarero	SAR	olivarero	trazabilidad del aceite de oliva de auto-control (sar) control de almacén	sin información (comenzando en 2019)	no		https://www.patrimonioliv arero.com/

Grupo operativo SOSTVAN-	Certified cows' cárnico	cárnico	estrategias tecnológicas para mejorar la sostenibilidad de la vaca nodriza	en proyecto Universidad de León	no	universidad de león. hyperledger. linux	https://www.sostvan.com/
Iberchain (pdo)	Iberico	cárnico	raza ibérica nativa de cerdo ibérico. evitar el fraude	el sistema basa criterios de calidad en análisis nirs aplicados a la discriminación racial. (inicio del proyecto 2019) no Alastria https://iberchain.es/	no	Alastria	https://iberchain.es/
Lechazo CLM (PDO)	control of traceability from birth to slaughterhouse as an anti-fraud mechanism for documentary	cárnico	evitar el fraude. control de trazabilidad desde el nacimiento hasta el matadero como mecanismo antifraude documental cordero lechal CLM	en proyecto (comienzo en junio 2022)	si	SMES led by kunfud on alastria's t-net (quorum-base) and EBSI (european blockchain services infrastructure)	https://www.kunfud.com/
Vinassure	Eprovenance wine	vinícola	rastrear los vinos desde el viñedo hasta el consumidor final	en proyecto (comienzo en junio 2022)	no	Plataforma para registro de datos IBM blockchain.	https://www.eprovenance.com/home/services/vinassure/
Vestigia	porcinova pilot	cárnico	control de trazabilidad y mecanismo antifraude para documentación	piloto	no	Alastria	https://porcinova.es/financiacion-pilot/

Tabla 4.1: Proyectos en curso o finalizados que utilizan tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a través de la cadena de suministro.

(Proyectos identificados a través de la bibliografía y referencias citadas por los agentes)

Además, la investigación basada en informes de adopción tecnológica, entrevistas con expertos del sector, y revisión de casos de uso documentados permitió la identificación y clasificación de diferentes blockchains y entre éstos, los utilizados en la industria alimentaria española:

Blockchains citados por la literatura científica o citados por los expertos durante las entrevistas	Uso en el ámbito de la industria alimentaria española
Alastria	Alastria: Sí, se usa en iniciativas nacionales de blockchain en España, incluido el sector alimentario.
Algorand	Algorand: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Binance	Binance: Principalmente conocido por su plataforma de intercambio de criptomonedas, no específicamente por aplicaciones en el sector alimentario.
Bitcoin	Bitcoin: Utilizado principalmente como criptomoneda, no directamente en la industria alimentaria.
Cardano	Cardano: Tiene proyectos en varias industrias, incluyendo trazabilidad en la cadena de suministro.
Chainlink	Chainlink: Utilizado para oráculos de datos, podría tener aplicaciones en la trazabilidad y verificación de datos en la industria alimentaria, pero no se han identificado en los proyectos analizados.
Cosmos	Cosmos: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Cudos	Cudos: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
EBSI	EBSI: Parte de iniciativas europeas para servicios de blockchain, que pueden incluir la trazabilidad alimentaria.
Ethereum	Ethereum: Amplia adopción en varios sectores, incluyendo iniciativas de trazabilidad alimentaria.
Hyperledger	Hyperledger: Muy utilizado en soluciones empresariales de blockchain, incluyendo la industria alimentaria.
LACNet	LACNet: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
ONTOCHAIN	ONTOCHAIN: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Polkadot	Polkadot: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Polygon	Polygon: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Quant	Quant: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.

Solana	Solana: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.
Tezos	Tezos: No hay información específica sobre su uso en la industria alimentaria española.

Tabla 4.2 identificación y clasificación de diferentes blockchains y su uso en la industria alimentaria española.

De esta tabla se puede extraer como los blockchains que se están utilizando en la industria agroalimentaria española son tecnologías actuales y de vanguardia. Algunos de los blockchains más utilizados, como Ethereum y Hyperledger, están en constante evolución y mejoran continuamente sus capacidades para satisfacer las demandas del mercado. Estas tecnologías están alineadas con las tendencias globales de digitalización y automatización, lo que las hace altamente relevantes en el contexto actual.

Los blockchains utilizados destacan en los artículos científicos por su seguridad, eficiencia, y capacidad de interoperabilidad, no obstante, tal y como ponen de manifiesto los artículos académicos y también buena parte de los expertos entrevistados, existe una necesidad de estandarización que habría que abordar y que, de acuerdo con la importancia resaltada en las entrevistas, se ha clasificado por prioridades conforme al siguiente esquema:

Prioridades de estandarización	Corto Plazo	Mediano Plazo	Largo Plazo
Interoperabilidad entre diferentes redes blockchain	✓		
Seguridad de Contratos Inteligentes	✓		
Inteligencia Artificial y blockchain			✓
Huella de CO2 del blockchain y otros servicios de alta computación			✓
Intercambio de Datos	✓		
Protección de Datos	✓		
Identificación electrónica y servicios de confianza		✓	
Identidad Descentralizada		✓	

Tabla 4.3 Prioridades de Estandarización Blockchain en el Contexto de la Industria Agroalimentaria

Las necesidades a corto plazo se justifican porque:

La interoperabilidad entre diferentes redes blockchain⁶ es importante para facilitar la integración

⁶ La interoperabilidad entre diferentes redes blockchain a nivel global enfrenta desafíos significativos debido a diferencias en las arquitecturas, mecanismos de consenso y modelos de gobernanza. La estandarización puede ayudar a superar estos obstáculos y facilitar la comunicación y el intercambio de datos entre distintas redes ([EU Blockchain Observatory and Forum](#)).

de diferentes sistemas blockchain utilizados en la cadena de suministro agroalimentaria para mejorar la trazabilidad y eficiencia. (por ejemplo, en el caso de facilitar la exportación de productos).

En cuanto a la seguridad de contratos inteligentes, esta es muy importante para automatizar procesos y transacciones en la cadena de suministro sean seguros y libres de vulnerabilidades, por ejemplo, aquellos que abordan la certificación y gestión de datos en la trazabilidad de productos como en los proyectos de Navidul y Covap.

Asimismo, la normativa de protección de Datos es crucial para asegurar que la información personal y sensible manejada en la cadena de suministro esté protegida y en principio afectaría a todos los proyectos que manejan datos personales de productores, distribuidores y consumidores, como Fish world track y Oleoestepa.

Con relación a la relevancia que puede tener las características que ofrece un sistema que utilice tecnología blockchain y su interés para la industria agroalimentaria, las respuestas de los expertos se sistematizaron en esta tabla de características, que se ordenaron por relevancia de acuerdo con el número de citas o referencias que hicieron los expertos:

Orden	Característica	Descripción
1	Data Provenance (Procedencia de Datos)	Incluye flujos de datos dentro y fuera de la cadena, confiabilidad de los datos, servicios/registros de oráculos verificables.
2	Cybersecurity (Ciberseguridad)	Incluye arquitecturas de sistemas distribuidos y descentralizados de código abierto, seguridad de endpoints, cifrado, mecanismos de consenso y teoría de juegos aplicada.
3	Identity Management (Gestión de Identidad)	Incluye soberanía propia, privacidad, anonimato, abstracción de cuentas, gestión segura de billeteras.
4	Governance (Gobernanza)	Incluye la reputación de los actores, incluyendo roles, derechos y responsabilidades; votación en línea; DAOs (organizaciones autónomas descentralizadas); comunidades virtuales peer-to-peer.
5	Tokenisation, Digital Asset Creation and Exchange	Incluye criptomonedas, activos virtuales, tokens fungibles y no fungibles, protocolos de intercambio.
6	Process Optimisation (Optimización de Procesos)	Incluye transparencia de procesos, compartición de recursos en la nube interoperables y multi-partes, computación de borde móvil y 5G, eficiencia energética.

7	Foundations (Fundamentos)	Incluye arquitectura de referencia, terminología, taxonomía, ontología.
8	Automation (Automatización)	Incluye contratos inteligentes, agentes inteligentes, robótica.
9	Use Cases (Casos de Uso)	Incluye colecciones de casos de uso genéricos y/o específicos de dominio.

Tabla 4.4. Características según su relevancia para la industria agroalimentaria española.

En principio, todas estas propiedades son útiles como aplicación a la industria agroalimentaria: la Procedencia de Datos y la Ciberseguridad (incluyendo en ésta los mecanismos de consenso) son esenciales en dicha industria para garantizar la trazabilidad y seguridad de los productos. La Gestión de Identidad y la Gobernanza aseguran que solo las entidades autorizadas puedan interactuar con los datos y procesos, estableciendo reglas claras. La Tokenización facilita el manejo de activos digitales que representan productos físicos, y la Optimización de Procesos mejora la eficiencia operativa. Los Fundamentos y la Automatización proporcionan la base conceptual y técnica para implementar soluciones avanzadas, mientras que los Casos de Uso ofrecen ejemplos prácticos y lecciones aprendidas.

No obstante, las dos primeras propiedades: garantía de la procedencia de datos y mecanismos de consenso son las que parece que los expertos consultados han destacado sobre las demás como de suma importancia en la industria agroalimentaria debido a la necesidad crítica de trazabilidad y protección contra fraudes. Esto es patente también en los casos de uso analizados que persiguen asegurar que los productos sean seguros, auténticos y de alta calidad.

La ciberseguridad garantiza la integridad y la protección de los datos, previniendo fraudes y manipulaciones a través de mecanismos de consenso que verifican las transacciones de manera descentralizada. Por ello, **asegurar que los datos sean confiables y estén protegidos es prioritario para mantener la confianza del consumidor, cumplir con normativas y asegurar la eficiencia operativa en la cadena de suministro agroalimentaria.**

Aunque España cuenta con condiciones favorables, como acceso a financiación y disponibilidad de tecnología, las soluciones blockchain desarrolladas hasta ahora en la industria agroalimentaria española no se están consolidando. Esto es a pesar de su evidente utilidad para agregar valor y diferenciar ciertos productos agroalimentarios.

4.2: Resultados extraídos de la segunda fase de la investigación: Identificación de Limitaciones Técnicas y Recomendaciones en la arquitectura y tratamiento de datos.

Aunque se aborda con más detalle en el apartado de discusión, se avanza como uno de los aspectos destacados por los expertos consultados es la importancia de la arquitectura de datos en un entorno de blockchain como elemento fundamental para garantizar la integridad, seguridad y eficiencia de las transacciones y procesos en la red.

La adecuación de la arquitectura de las capas de datos, los flujos y el tipo de datos utilizados para optimizar las transferencias permite a las blockchain proporcionar una infraestructura segura, eficiente y descentralizada. Por ello, y como contribución a la estandarización de soluciones aplicables a la trazabilidad de alimentos desde el sector primario, en un segundo apartado de la tesis se presenta un estudio con recomendaciones para la gestión de datos. En esta sección, se examina la literatura científica que aborda la arquitectura y el tratamiento de datos en sistemas que utilizan tecnología blockchain, evaluando su eficacia en la certificación de datos relativos a las condiciones de la producción primaria a lo largo de la cadena agroalimentaria

4.2.1 Resultados de la búsqueda bibliográfica:

La búsqueda bibliográfica en Science Direct 2019-2023 detallada en el apartado de metodología ha identificado varios artículos relevantes, cuya relación detallada se recoge en el Anexo A.

Entre los estudios destacados se encuentran:

Zhao et al. (2019) en "Computers in Industry": Altamente citado y leído, subraya la importancia de blockchain en la gestión de la cadena de valor agroalimentaria.

Marchesi et al. (2022): Presenta arquitecturas industriales de blockchain.

Zhang et al. (2022): Enfocado en factores críticos de éxito para implementar blockchain en cadenas de suministro sostenibles.

Mistry et al. (2020): Explora el uso de blockchain para IoT en la automatización industrial, con numerosas citas.

Los artículos recogen desde revisiones sistemáticas hasta casos específicos, proporcionando una visión integral de las aplicaciones y desafíos de blockchain en el sector agroalimentario. La mayoría de los artículos seleccionados por la búsqueda analizan sistemas y muestran los beneficios de la tecnología blockchain como una solución eficiente para sistemas de gestión de datos a gran escala basados en Internet of Things (IoT) (Dey & Shekhawat, 2021; Sezer et al., 2022), sin embargo, la selección dio como resultado una muestra reducida de artículos dirigidos

a analizar la organización y manipulación correcta de los datos dentro del sistema, no obstante se pudieron extraer bastantes conclusiones de autores aplicaron un enfoque de análisis de contenido cualitativo (Levac et al., 201).

Como resumen de la clasificación de la literatura realizada en el Anexo A, la temática que abordaban los artículos dedicados al estudio de arquitecturas de blockchain y suficiencia respecto a la eficacia en la certificación de datos de la producción primaria a lo largo de la cadena los artículos analizados se pueden agrupar de la siguiente manera:

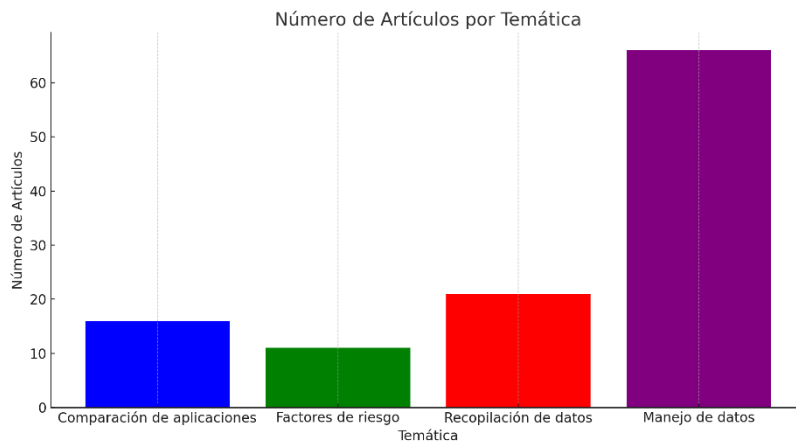


Fig. 4.3: clasificación de artículos por temática

Como resultados del estudio bibliográfico se señala que el análisis ha permitido obtener una visión general de las variables críticas de la arquitectura blockchain con respecto a la recolección y manejo de datos informada en la literatura y la evaluación de las soluciones potenciales presentadas por los autores para cada variable que se describe a continuación.

4.2.2 Variables críticas identificadas en el estudio bibliográfico para mejorar la arquitectura de blockchain en la recopilación de datos y optimizar las respuestas al consenso de red.

Variables críticas con relación a la veracidad del dato o información que se almacena en la blockchain.

- Entrada de datos (Captura):

Contar con un procedimiento confiable de captura de datos es clave para validar la confiabilidad de las transacciones y garantizar la confianza en el sistema, como se discute en las revisiones mostradas por varios autores (Saurabh & Dey, 2021; Machado et al., 2020). Además, muchos autores han sugerido la posibilidad de reemplazar la entrada manual de datos en la blockchain con un sistema automatizado a través de dispositivos IoT a prueba de manipulaciones que puedan certificar directamente los datos en la blockchain (Bayano-Tejero et al., 2019; Manning et al., 2022). Sin embargo, esto requiere equipos adicionales de software y hardware, lo que puede llevar a ciertos costos de solución. Por lo tanto, se necesita un enfoque óptimo para permitir tanto la precisión como la eficiencia en costos.

En este sentido, el mismo acceso o control del sistema puede realizarse mediante la verificación cruzada con los datos presentados en bases de datos oficiales y luego registrar transacciones a través de un Contrato Inteligente (Hewa et al., 2021). Por ejemplo, los datos de origen de la granja dentro de una Denominación de Origen pueden ser ingresados por un agricultor siempre que la granja esté registrada a nombre de ese agricultor. La cantidad de cosecha registrada en dicha granja también debe estar dentro de un rango específico de parámetros para que el contrato se perfeccione.

- **Pertinencia:**

Con respecto al dominio técnico, el primer desafío es planteado por el problema de "coherencia del gemelo digital". Lo que se rastrea y certifica a través de la blockchain es de hecho un gemelo digital del mundo real, pero es difícil garantizar hasta qué punto el gemelo digital refleja el mundo real. Verificar este aspecto está estrechamente relacionado con otro factor de gestión de datos "Demanda de datos", aunque actualmente se sabe muy poco sobre qué información se proporciona y se proporcionará a los consumidores finales en el futuro. Los datos serán pertinentes en la medida en que certifiquen los aspectos específicos que el sistema ofrece al consumidor. Este aspecto es especialmente importante en el control de que los productos estén etiquetados de acuerdo con las características de los productos en el momento de la compra que sea posible de probar.

VARIABLES CRÍTICAS DE BLOCKCHAIN CON RESPECTO AL MANEJO DE DATOS DIRECTAMENTE INVOLUCRADAS EN LA ADECUACIÓN DE LAS RESPUESTAS AL CONSENSO DE RED. La revisión de la literatura muestra las siguientes vulnerabilidades relacionadas con el manejo de datos:

- **Almacenamiento de datos**

El almacenamiento de datos puede ser un problema con las tecnologías basadas en blockchain, tanto en términos de velocidad como de costos. Por lo tanto, muchos

proyectos de trazabilidad utilizan una base de datos externa para almacenar los datos, y solo el hash de los datos se coloca en la propia blockchain. El acceso, uso y seguridad de las bases de datos externas vinculadas a la blockchain tienen un gran impacto en la integridad, transparencia y control de los datos en el sistema. Para mantener un sistema descentralizado, se pueden utilizar bases de datos descentralizadas, como el Sistema de Archivos Interplanetario, una base de datos descentralizada para almacenar archivos. TE-Food y FairChain también almacenan datos fuera de la cadena (Köhler & Pizzol, 2020). La descentralización se ve a menudo como una medida de seguridad de almacenamiento de datos para evitar un 'único punto de falla', promoviendo así la descentralización del poder y la información. Sin embargo, la descentralización es un aspecto complicado, ya que depende de la configuración de la blockchain y los roles atribuidos a los participantes de la blockchain.

La configuración del almacenamiento de datos afecta la privacidad de los datos, ya que la información almacenada fuera de la cadena puede no ser tan fácilmente accesible. Además, se necesita transmitir una cantidad menor de datos en la cadena, lo que tiene un efecto positivo en la velocidad y el costo de las tecnologías basadas en blockchain. Además, la descentralización debe considerar a todos los miembros del sistema, incluidos aquellos con menos recursos (Zhao et al., 2019).

Al igual que el almacenamiento fuera de la cadena de datos, el Protocolo de Libro Mayor Rápido (FLP) trabaja para aumentar la velocidad de almacenamiento de datos en una blockchain. Esta tecnología utiliza un sistema de fragmentos que se activan para almacenar una copia de los datos solo cuando se necesita una actualización. A través de esta tecnología, las transacciones no solo son más rápidas sino también más económicas.

Los datos también pueden cifrarse para aumentar la privacidad. El cifrado puede hacerse con un algoritmo de cifrado unidireccional estandarizado como un algoritmo de hash, que solo es descifrable con la clave, o con un algoritmo de cifrado simétrico que es descifrable con la clave utilizada para el cifrado. El tipo de cifrado utilizado depende de los requisitos del proyecto y la información que necesita ser almacenada. Además de las técnicas de almacenamiento y cifrado de datos, se puede implementar una capa adicional de seguridad. Con servicios basados en la nube (Eluubek kyzy et al., 2021), están disponibles cortafuegos de hardware especializados para proteger los eventos de datos.

Almacenamiento descentralizado e identidad.

La conformidad de la blockchain con el GDPR es un tema controvertido en términos de que la información personal pueda incluirse en la blockchain y así permanecer inmutable, y esta es una de las piezas fundamentales de su funcionamiento, privando a la parte

interesada de solicitar al Encargado que borre los datos personales, algo que también se extendería a las disposiciones de conservación de datos de carácter personal (por el tiempo mínimo indispensable) y la exactitud en cuanto a la actualización de dichos datos. Las disposiciones sobre el encargado y el responsable del tratamiento de datos también serían difíciles de cumplir cuando no es solo un agente quien controla la red. Por lo tanto, el diseño del sistema también debe tener en cuenta esta característica. En el caso de los datos personales, el diseño del sistema debe cumplir con el esquema de regulación europeo de protección de datos, para que los datos personales puedan almacenarse en billeteras de usuario, reduciendo el riesgo de violaciones de datos a gran escala, ya que los datos personales solo se comparten con otras partes con el permiso del usuario.

- Comunicación de datos

Se refiere a cómo las tecnologías basadas en blockchain comparten información de trazabilidad con los consumidores finales. La transparencia en la arquitectura de los sistemas es esencial para garantizar y auditar esta información para el consumidor. En la mayoría de los casos, se puede escanear un código QR o una etiqueta NFC para acceder a información sobre el producto respectivo que incluye imágenes o datos complejos y pesados de la granja, el origen o la apariencia del animal. Estos datos se almacenan en servidores externos a la blockchain. En un sistema que garantiza y promociona la trazabilidad de la información a través de la tecnología blockchain que utiliza bases de datos y elementos externos, debe diferenciarse que la información realmente esté relacionada con las transacciones que se almacenan en la blockchain y qué información proviene de otras fuentes que podrían manipularse, especialmente si residen en bases de datos no descentralizadas controladas por los nodos del sistema. Dentro de la Unión Europea, la información nutricional que se puede ofrecer al consumidor debe estar respaldada por evidencia específica y se deben evitar las afirmaciones falsas. Por lo tanto, estos sistemas de información también deben garantizar que no participen en prácticas engañosas, como hacer afirmaciones sobre un producto si solo son verdaderas sobre una parte del mismo o su proceso de fabricación.

Las siguientes características tienen una relación directa con lo expuesto anteriormente: la transparencia de los datos y su verificación.

- Transparencia de datos

Debido a las fuerzas relacionadas con el mercado y la competencia, es cada vez más importante garantizar que los datos relacionados con la calidad sean creíbles y verificables. Sin embargo, existen desafíos significativos para lograr estos objetivos debido a las limitaciones de las tecnologías existentes para capturar datos de manera homogénea

y asegurar la confiabilidad de los datos ingresados manualmente (Compagnucci et al., 2022). Como se mencionó anteriormente en la sección de "entrada de datos", la captura automatizada puede ser una solución. Las tecnologías habilitadas para blockchain también están conectadas a menudo a un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) o a un lector de Identificación por Radiofrecuencia (RFID), que permite registrar la ubicación del producto a medida que se mueve a través de la cadena de suministro, pero no en todos los casos, ya que implica inversiones cuantiosas.

No obstante, un sistema que sea transparente y contenga datos unificados y verificables para todos los operadores, incluidos los datos contenidos en bases de datos de control oficiales, podría llevarse a cabo fácilmente mediante auditorías simplemente comparando la información proporcionada al consumidor con los datos suministrados o recopilados en bases de datos oficiales, con el control de verificación perteneciente al productor o procesador que puede acceder / proporcionar los datos a la administración sin control del mercado de sellos comerciales de terceros.

Por ejemplo, en un caso (que posteriormente se desarrollará) para dar trazabilidad a capturas de la pesca extractiva se podría implementar un sistema que mostrase al consumidor el nombre del barco, la fecha y la zona de pesca (datos listados en bases de datos oficiales) relacionados con un lote de merluza, por ejemplo, y sería fácil verificarlo simplemente cruzando la información con las coordenadas del sistema de seguimiento de flotas VMS. De esta manera, una cooperativa pesquera podría certificar la precisión de la información asociada con sus capturas en el punto de venta.

- Verificación de datos:

También es necesario que las partes interesadas en el público sepan cómo acceder a los datos brutos de la blockchain. Si nadie sabe cómo acceder a estos datos, no se pueden verificar con la información proporcionada para los consumidores. Las tecnologías basadas en blockchain pueden recopilar grandes cantidades de datos que en principio pueden usarse para análisis de datos y auditorías independientes. Esto idealmente puede ayudar a identificar patrones y resaltar errores honestos, así como errores intencionales. Compliance Blockchain ayuda a hacer cumplir las regulaciones, pero se necesita reglas específicas y globales para las interacciones realizadas en la plataforma, como se mencionó anteriormente, Blockchain puede mejorar los procesos de verificación de autenticidad a través del intercambio de información y el acceso en tiempo real, pero también a través de la verificación cruzada con Bases de Datos Oficiales, un aspecto menos explorado y estudiado en la literatura científica.

4.3: Evaluación de Sistemas Públicos y Estudio Legal

En coherencia con el contenido de la tesis, dirigido a evaluar los sistemas de trazabilidad basados en tecnología blockchain para certificación de condiciones de producción en la industria alimentaria. Situación en España. El estudio legal debe examinar dos aspectos regulatorios:

El primero son las disposiciones específicas que afectan o condicionan el uso de los sistemas de blockchain.

Y el segundo el conjunto de regulaciones y sistemas de monitoreo que exigen el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.

4.3.1 Disposiciones específicas que afectan o condicionan el uso de los sistemas de blockchain.

Con relación a las disposiciones que afectan o condicionan el uso de los sistemas de blockchain, destacan las disposiciones de la Unión Europea dirigidas a establecer un marco regulatorio que aborde las necesidades emergentes en términos de privacidad de datos, finanzas digitales, inteligencia artificial y resiliencia operativa, promoviendo así un entorno digital seguro y eficiente.

Las políticas regulatorias europeas más relevantes que inciden o pueden incidir en los sistemas blockchain son las siguientes:

GDPR (General Data Protection Regulation):

Reglamento General de Protección de Datos: Implementado en mayo de 2018, establece un marco legal para la protección de datos personales en la Unión Europea, garantizando derechos de privacidad y control de los datos para los ciudadanos.

MiCAR (Markets in Crypto-Assets Regulation) 2019:

Reglamento de Mercados de Criptoactivos: Propuesto en 2019, busca establecer un marco regulatorio para los criptoactivos en la UE, incluyendo normas para emisores de criptoactivos y proveedores de servicios relacionados.

EU Data Act 2022:

Ley de Datos de la UE 2022: Propone un marco para facilitar el acceso y el uso de datos no personales en la UE, promoviendo la economía de datos y garantizando que más datos estén disponibles para su uso e intercambio.

EU AI Act 2024:

Ley de Inteligencia Artificial de la UE 2024: Propuesta para regular el uso de inteligencia artificial en la UE, estableciendo requisitos para el desarrollo y la utilización de sistemas de IA, con el fin de garantizar la seguridad y los derechos fundamentales.

eIDAS 2 (Electronic Identification and Trust Services) 2024:

Reglamento de Identificación Electrónica y Servicios de Confianza: Actualización del reglamento eIDAS, que regula los servicios de identificación electrónica y las transacciones electrónicas seguras dentro del mercado único digital de la UE.

DORA (Digital Operational Resilience Act) 2025:

Ley de Resiliencia Operativa Digital: Propuesta para 2025, destinada a mejorar la resiliencia operativa digital de las entidades financieras en la UE, asegurando que puedan soportar y recuperarse de interrupciones y ciberataques.

ECB Digital Euro:

Euro Digital del Banco Central Europeo: Proyecto del BCE para la creación de una versión digital del euro, destinada a complementar el efectivo y mejorar la eficiencia de los pagos electrónicos en la zona euro.

De las anteriores, las disposiciones que más afectan a la trazabilidad de alimentos son:

- GDPR (General Data Protection Regulation)
- EU Data Act 2022
- eIDAS 2 (Electronic Identification and Trust Services) 2024

Estas regulaciones son esenciales para asegurar la gestión adecuada y segura de los datos, facilitar el acceso y la interoperabilidad de la información, y garantizar la verificación de identidades y transacciones en la cadena de suministro agroalimentaria.

4.3.2 Regulaciones y sistemas de monitoreo que exigen el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.

Se trata de identificar disposiciones establecen la recogida y el control de información, que podría ser útil de cara a optimizar la recopilación de datos en los sistemas blockchain y su compatibilidad con sistemas públicos.

Este análisis ha dado lugar a una compilación de regulaciones incluyen una variedad de decretos reales, leyes y directivas que cubren aspectos de seguridad alimentaria, higiene, trazabilidad de productos, salud animal, uso de productos fitosanitarios, registro de explotaciones ganaderas, sistemas de información de mercados y mucho más.

Se ha identificado la normativa a en vigor de aplicación que puede emanar, bien de las autoridades nacionales o de la Unión Europea, la compilación realizada muestra como las disposiciones relativas a la toma y tratamiento de datos de control en el sector agroalimentario es complejo y multifacético, con un fuerte énfasis en la seguridad, la trazabilidad y la sostenibilidad, apoyado por una infraestructura robusta de sistemas de información y registro. Se destaca el Reglamento (CE) N° 178/2002, que establece los principios generales de la legislación alimentaria, y varias otras leyes específicas, como la Ley 17/2011 sobre seguridad alimentaria y nutrición. También se consideran sistemas específicos de información y registro, como el Sistema de Información de Mercados del Sector del Vino, el Sistema TRACES para el control de importaciones y exportaciones de animales y productos de origen animal, y el Sistema de Información Unificado del Sector Lácteo.

Estas regulaciones y sistemas de monitoreo abordan una amplia gama de aspectos, desde la seguridad y la higiene de los productos alimentarios hasta el registro de movimientos de ganado y la identificación de animales individuales. Además, regulan el uso sostenible de productos fitosanitarios, la gestión de maquinaria agrícola y la sostenibilidad nutricional de los suelos agrícolas.

Por su extensión la compilación completa se recoge en el Anexo B

La producción agroalimentaria en España está sujeta a una extensa regulación y control, que abarca desde la seguridad alimentaria y la higiene hasta la trazabilidad de productos y la salud animal. Esto incluye tanto regulaciones de la UE como leyes y decretos nacionales y una infraestructura robusta de sistemas de información y registro que apoyan la gestión de datos en diversos sectores, como el lácteo, el olivarero, el tabaco crudo y otros. Estos sistemas permiten la recopilación y el acceso a datos detallados, facilitando la transparencia y el control a lo largo de la cadena de suministro.

Varias de las regulaciones recientes se centran en la sostenibilidad, como el Real Decreto 1051/2022 que establece normas para la nutrición sostenible de los suelos agrícolas, y el Real Decreto 1049/2022 que establece normas para la aplicación de condicionalidades reforzadas y condicionalidades sociales.

Conformidad con la Política Agrícola Común: Muchas de las regulaciones y sistemas están alineados con la Política Agrícola Común (PAC) de la UE, incluyendo la gestión de fondos agrícolas europeos y el establecimiento de derechos de apoyo a la renta básica.

Desafíos de Integración de Datos: A pesar de la robusta infraestructura regulatoria y de datos, existen desafíos en la integración y gestión eficiente de esta vasta cantidad de información, particularmente en lo que respecta a la protección de datos personales y la conformidad con regulaciones como el GDPR.

Capítulo 5

Discusión

5.1 Análisis de los datos extraídos del estudio bibliográfico y del trabajo de campo sobre la implementación de blockchain en la industria alimentaria española.

5.1.1 Tendencias y brechas observadas en el uso de la tecnología blockchain en la industria agroalimentaria.

La tecnología blockchain puede implementarse de diversas maneras y objetivos, los sistemas de registro distribuido son considerados uno de los avances más significativos en la tecnología de la información desde la aparición de Internet. Sin embargo, su desarrollo está en una etapa incipiente y su crecimiento dependerá de los avances técnicos, los patrones de adopción, las innovaciones aplicadas a los modelos de negocio y la resolución de desafíos legales y de gobernanza. En un contexto donde la credibilidad en las estructuras de control gubernamentales o la reputación de las empresas no es infalible, la tecnología blockchain ofrece una alternativa fiable y creíble que puede ayudar tecnológicamente a implementar y certificar el cumplimiento de las normas regulatorias. No obstante, queda mucho trabajo por hacer para que los sistemas se adopten ampliamente en diversos sectores (Vaghani et al., 2022; Gartner Blog Network, 2021).

Como se ha puesto de manifiesto en las primeras aproximaciones al estado del arte y por el contenido de las publicaciones científicas en diferentes áreas geográficas, por la menor proliferación de artículos académicos parecería que, en los países occidentales, especialmente en Europa, existe un menor desarrollo de sistemas de blockchain aplicados a la industria agroalimentaria para certificar condiciones de producción de alimentos. Esto ocurre a pesar de los esfuerzos europeos por desarrollar normas de trazabilidad de alimentos “de la granja a la mesa”⁷ sellos de garantía que certifican el origen, las condiciones de producción⁸, condiciones

⁷ [De la granja a la mesa - Consilium \(europa.eu\)](#)

⁸ [Mercado CE: obtención del certificado, requisitos de la UE - Your Europe \(europa.eu\)](#)

de salubridad⁹ y otros factores como respeto medioambiental en la producción de alimentos¹⁰.

La menor atención a la seguridad alimentaria mediante blockchain en Europa podría deberse precisamente a que los robustos sistemas de control existentes que obligan a reportes permanentes de información a todos los operadores, ya garantizan a través de los controles administrativos, el origen y la seguridad alimentaria desde un punto de vista sanitario. Europa cuenta con un complejo marco regulatorio que abarca la agricultura, la pesca y el control oficial de alimentos, complementado con sistemas de registro electrónico. Este sistema asegura la salubridad y el origen de los productos para los consumidores europeos, algo que no es tan prevalente en otras regiones, suponiendo un sistema de reporte continuo sometido a numerosos controles que supone una enorme carga burocrática para todos los agentes de la cadena.

Asimismo, la tecnología blockchain aún no se utiliza en informes oficiales o registros en el ámbito agroalimentario, a pesar de su utilidad puesta de manifiesto como un “complemento de la ley (Werbach, K, 2018), casos en los que, soluciones basadas en blockchain pueden ayudar a abordar problemas que obstaculizan el cumplimiento de las normas legales. En tales situaciones, el registro en blockchain no actúa como un enfoque paralelo a los registros tradicionales, sino como un mecanismo que ayuda a un cumplimiento práctico.

Por ejemplo, en el caso de la pesca, el sistema de seguimiento de buques (VMS) para barcos pesqueros está en vigor desde la década de 1990¹¹ y los certificados de captura desde 2010¹². Como otro ejemplo, la Ley de Seguridad Alimentaria de la UE entró en vigor en 2002¹³, una norma que implica que la trazabilidad sea obligatoria para todas las empresas de alimentos y piensos, comprendiendo un sistema complejo de controles oficiales. Estas iniciativas se han complementado con sistemas de registro electrónico para alimentos importados y medios de registro y control informatizados y electrónicos. En Europa, también existe un extenso sistema de reglas adicionales sobre etiquetado y sellos de garantía, por lo que, en general, el consumidor en Europa tiene un sistema de garantía de salud y origen que ya está cubierto en gran medida por el sistema de control público. El acervo comunitario en estas materias es quizás el más complejo del mundo, pero no es el único. En la pesca, por ejemplo, existen iniciativas equivalentes en otros países de mentalidad occidental, como el programa de importación y seguimiento de mariscos de EE. UU y las disposiciones relativas a las normas de Etiquetado de Origen (Country of Origin Labeling, COOL).

⁹ [Seguridad alimentaria - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

¹⁰ [Producción y productos ecológicos - Comisión Europea \(europa.eu\)](#)

¹¹ eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:51996PC0232&from=DE

¹² [L_2008286ES.01000101.xml \(europa.eu\)](#)

¹³ <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2002-80201>

En dicho sector, las regulaciones oficiales, dirigidas al control medioambiental y sanitario, coexisten con el desarrollo de múltiples nuevas aplicaciones orientadas al mercado y que éstas si utilizan tecnología blockchain, desde aquellas ofrecidas por organizaciones no gubernamentales (ONG), como certificaciones y eco-calificaciones, hasta otras orientadas a mejorar la trazabilidad, especialmente cuando la producción integra alimentos o materias primas de diferentes orígenes o puede haber falsificaciones. Estas aplicaciones "privadas" no están estandarizadas y no todos los proveedores de tecnología integran los mismos datos o lo hacen de la misma manera. Al mismo tiempo, varias referencias académicas apuntan a la necesidad de incorporar el intercambio de datos cruciales o llevar a cabo la verificación de los datos integrados manualmente como un elemento clave de estas aplicaciones (Xiong et al., 2020) (Zhang, Z., Song, Liu, Yin, Wang, & Lan, 2021).

Específicamente, en el ámbito agroalimentario, aunque hay bastantes potenciales oportunidades que se han analizado en la literatura científica, hay pocos ejemplos en los que el uso de blockchain se haya traducido en soluciones comerciales (Una compilación de las principales aplicaciones identificadas y evaluados a lo largo del estudio se puede encontrar en la Tabla D 1 “soluciones basadas en el mercado”, recogida en el Anexo D de este documento). Debido a su aparición en las citas bibliográficas, de entre todas las soluciones analizadas, el caso más conocido probablemente sea la plataforma blockchain creada entre Walmart e Hyperledger y el proyecto IBM Trustchain, reemplazada recientemente por la aplicación IBM Food Trust).

Experiencias como las de IBM Trustchain fueron pioneras en la aparición de servicios BAAS de terceros (blockchain como servicio), que ofrecen plataformas funcionales que pueden adaptarse a las necesidades del cliente. Actualmente hay una gran cantidad de empresas que ofrecen estos servicios (Microsoft, IBM, Oracle, Amazon, Alibaba, SAP, Accenture, Baidu, Huawei, Kaleido Hewlett-Packard Enterprise, entre otros) (Jesús Alfonso & Muñoz Jiménez, 2020) y algunas han desarrollado soluciones específicas para el sector agroalimentario (Berneis, 2021).

Asimismo, ya a partir de 2020, y con la aparición de nuevas arquitecturas de DLT, los artículos científicos (Berneis, 2021) han cuestionado la noción de que estos sistemas de DLT realmente intercambian datos verídicos, precisos y validados; los artículos también cuestionan su utilidad, lo que se traduce en un interés académico en el análisis de entradas externas y oráculos, es decir, cómo introducir datos externos en la red. Los artículos más recientes dan una mayor importancia a la inteligencia artificial para gestionar datos externos sin intervención humana, o como medio automático de verificación de datos (las cuestiones relativas al tratamiento de datos se convierten en una cuestión crucial en la arquitectura de los sistemas de blockchain, tal y como ilustra la figura 4.3. También se analiza la relevancia de la información en aplicaciones prácticas, considerando en qué medida estos datos certifican información relevante para el consumidor (por ejemplo, identidad, condiciones de producción, etc.), y cuál es el papel y el estado de los

estándares. Otro tema de interés es el valor añadido del uso de estos sistemas para el productor, que parece ocurrir solo en productos de valor para los productores donde, por ejemplo, la existencia de falsificaciones es un problema.

Con el avance de los años encontramos artículos con coincidencias en la propuesta de sistemas más complejos, como la recopilación de datos utilizando sensores IoT además de blockchain (Akhtaruzzaman Khan et al., 2022) (Zhang, Z. et al., 2021) para garantizar la integridad de los datos (veracidad e inmutabilidad). El objetivo es mejorar la integración de la información, derivada de las condiciones de producción, que se almacena en un sistema blockchain, como una mejora sobre otros sistemas que se basan en información proporcionada a través de declaraciones que no tienen garantías y supervisión o auditoría suficiente.

A partir de 2022, se encuentran muchas referencias tanto en documentos científicos (Vaghani et al., 2022) como en artículos informativos (Gartner Blog Network. 2021) que apuntan al "cansancio blockchain", derivado del hecho de que, a pesar de las expectativas, muchos de los proyectos siguen en fase piloto debido a la falta de estándares, la falta de convergencia de tecnologías, la inmadurez, el problema de escalabilidad y de interoperabilidad¹⁴, un alcance demasiado ambicioso y una falta de comprensión de cómo la tecnología podría ayudar a resolver el problema en cuestión.

Si volvemos al ejemplo del sector pesquero (al ser la industria pesquera una de las más activas en el desarrollo de soluciones de software basadas en tecnologías DLT) se encuentran una amplia gama de sistemas de certificación o sellos de garantía de productos (autenticando aspectos relacionados principalmente con el origen, su manipulación y el tiempo) para ganar la confianza del consumidor¹⁵, pero en la práctica, pocos proveedores de soluciones o sellos han consolidado estas soluciones de manera estable y a largo plazo. La compilación de proyectos llevada a cabo en la investigación se recoge en la tabla D.2 del anexo D.

De todo ello se ha deducido el interés científico que existe en estudiar las entradas y captura de

¹⁴ En la primera consulta pública de SEEBLOCKS.eu, se destacó la alta importancia de varios elementos clave para asegurar la interoperabilidad y la seguridad en la integración de tecnologías. Los modelos de gobernanza para habilitar la interoperabilidad en la pila tecnológica, que incluye computación en la nube, computación punto a punto y computación en el borde y niebla, son esenciales para garantizar que todos los componentes tecnológicos trabajen juntos de manera eficiente y segura. Además, los estándares para formatos de datos e interoperabilidad, como eIDAS2 y SWIFT, son cruciales para asegurar que la información se comparta y entienda consistentemente entre diferentes sistemas y organizaciones, manteniendo la integridad y fiabilidad de los datos en la cadena de suministro agroalimentaria. Asimismo, las directrices para seguridad, privacidad y acceso, incluyendo normativas como DORA, GDPR, EU Digital Identity y eIDAS2, son fundamentales para proteger la información sensible y garantizar el cumplimiento regulatorio, aspectos críticos para la confianza de los consumidores y la integridad de la cadena de suministro.

¹⁵ En la pesca, ha sido posible identificar veinte artículos informativos que se refieren al uso de blockchain para garantizar su producto.

datos y desarrollar estándares sobre la recopilación e inclusión de datos o su certificación que garanticen que la cadena de bloques no solo haga que la información sea inmutable, sino que lo que se registre a través de la blockchain sea preciso, adecuado y consista en información relevante para el propósito. Cabe señalar con respecto a este objetivo que no todas las aplicaciones integran los mismos datos ni persiguen el mismo fin, como muestra han identificado varios proyectos internacionales de interés a partir de la bibliografía (ver Tabla D.5 del Anexo D).

5.1.2 Identificación de proyectos blockchain en el sector agroalimentario en España. Análisis.

El análisis de las soluciones basadas en el mercado que se están utilizando en España (como se expone en la Tabla 4.1 del apartado de resultados) muestra distintas aproximaciones en la implementación de la tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a través de la cadena de suministro. IBM destaca como proveedor de una solución que podría considerarse “en producción” al ofrecer una solución integral con su plataforma 'Food Trust', que adapta a cada caso concreto, mientras que la mayoría de los proyectos han desarrollado soluciones personalizadas.

Estas iniciativas están dirigidas a mejorar la trazabilidad y la transparencia, aunque aún enfrentan varios desafíos que deben ser abordados para lograr una adopción más amplia y efectiva. La plataforma 'Food Trust' de IBM parece ser el único proyecto escalable que actualmente está en producción. El análisis también revela que la mayoría de los proyectos han aprovechado las infraestructuras de blockchain disponibles, como la Infraestructura de Blockchain europea (EBSI) y, específicamente en España, la plataforma Alastria. Alastria ha sido fundamental para la implementación de soluciones específicas de trazabilidad, como se detalla en la Tabla 4.1, dentro del ámbito agroalimentario español.

A este respecto, con relación a la primera de las preguntas de investigación en la tesis se relacionaba con el interés y las condiciones encontradas en España para la adopción de tecnologías blockchain en el ámbito agroalimentario y la identificación de casos relevantes de implementación se señala lo siguiente: A través de la encuesta y la investigación de escritorio, se identificaron y analizaron detalladamente 17 proyectos que utilizan tecnología blockchain para certificar aspectos relacionados con las condiciones de producción, sin embargo existen muchos más de acuerdo a la información recogida en los fondos de recuperación sobre financiación de proyectos, o los citados por los autores. Por tanto, se puede señalar que, a pesar del bajo impacto de estos proyectos en la literatura científica, se contacta una experiencia significativa de casos de uso en España. Además los blockchains utilizados en la industria agroalimentaria española analizados demuestran la alineación con las tendencias globales de digitalización y automatización, lo que las hace altamente relevantes en el contexto actual (tal y

como reflejan las tablas 3.4 y 4.4 que recogen los datos de la investigación). Los blockchains utilizados destacan por su seguridad, eficiencia y capacidad de interoperabilidad, aunque todos los encuestados señalaron la necesidad de estandarización que todavía está pendiente de abordarse.

De hecho, parece que el uso de tecnología blockchain está cada vez más presente en el sector agroalimentario español para aumentar la transparencia y la trazabilidad en la cadena de suministro. Los casos de uso más comunes para blockchain en el sector agroalimentario en España incluyen el seguimiento de alimentos desde la granja a la mesa, el seguimiento del ganado y el bienestar animal, y la certificación del origen o manipulación de los productos. Al utilizar tecnología blockchain, las empresas distribuidoras o las asociaciones de productores tienen acceso a datos en tiempo real y proporcionan una certificación adicional de las condiciones de producción, ya controladas por otras vías, a los consumidores.

Las tecnologías blockchain también se utilizan para verificar la calidad de los productos ante el consumidor y garantizar el cumplimiento de regulaciones industriales voluntarias. En este contexto, la tecnología blockchain actúa "como complemento de la ley o del compromiso industrial", proporcionando una capa adicional de control sobre las regulaciones, sin reemplazar los procesos tradicionales de verificación. Esto se debe a que la implementación de soluciones blockchain y las bases de datos externas utilizadas en la mayoría de los casos se ha realizado sin un análisis previo exhaustivo. Así, en lugar de simplificar procesos, habilitar transacciones más eficientes y seguras, o servir como un canal alternativo de verificación, el blockchain se está utilizando como una capa adicional de control que complementa los métodos tradicionales de comunicación y verificación (Xiwei Xu et al., 2017). De las entrevistas también se dedujo que la elección de blockchain frente a otras tecnologías había carecido de un debate previo entre los actores involucrados que evaluara otras alternativas tecnológicas que, en determinados casos, podrían responder a necesidades específicas de manera más eficiente.

La tecnología blockchain es particularmente útil para establecer situaciones de confianza entre actores que desconfían o no se conocen, proporcionando un sistema de verificación seguro y transparente. Esta capacidad es fundamental en contextos donde la confianza es difícil de establecer debido a la falta de conocimiento previo o a la existencia de conflictos de intereses. Por ejemplo, en transacciones entre partes desconocidas, blockchain ofrece una solución confiable al permitir la verificación de datos sin necesidad de intermediarios tradicionales, lo que reduce el riesgo de manipulación de la información y aumenta la transparencia de las transacciones.

Sin embargo, para establecer relaciones de confianza entre actores que ya son confiables, pueden utilizarse otros sistemas más sencillos y menos costosos que blockchain. En estos casos,

los métodos tradicionales de verificación, como auditorías, pueden ser suficientes para garantizar la fiabilidad de las transacciones. Estos sistemas no solo son más económicos, sino que también son más fáciles de implementar y mantener, lo que los hace más adecuados para contextos donde ya existe una base de confianza mutua.

También hay que tener en cuenta que la mayoría de las soluciones analizadas en este estudio no han avanzado más allá de la fase piloto, ya sea porque actualmente aún se están probando o porque no se han consolidado. Aquellos entrevistados que habían participado directamente en la implementación de proyectos no consolidados estuvieron de acuerdo en que la razón por la que estos no se escalan radica en la dificultad de traducir el valor añadido del sistema, es decir, en transformar esas garantías de trazabilidad en beneficios económicos suficientes que justificaran mantener el sistema. Por esta razón, algunos casos que pueden considerarse exitosos desaparecen cuando el apoyo financiero que facilitó su implementación inicial se agotó.

A partir del análisis se deduce que el diseño de las aplicaciones informáticas utilizadas que utilizan blockchain para certificar las condiciones de producción generalmente responde al esquema presentado en la Figura 5.1

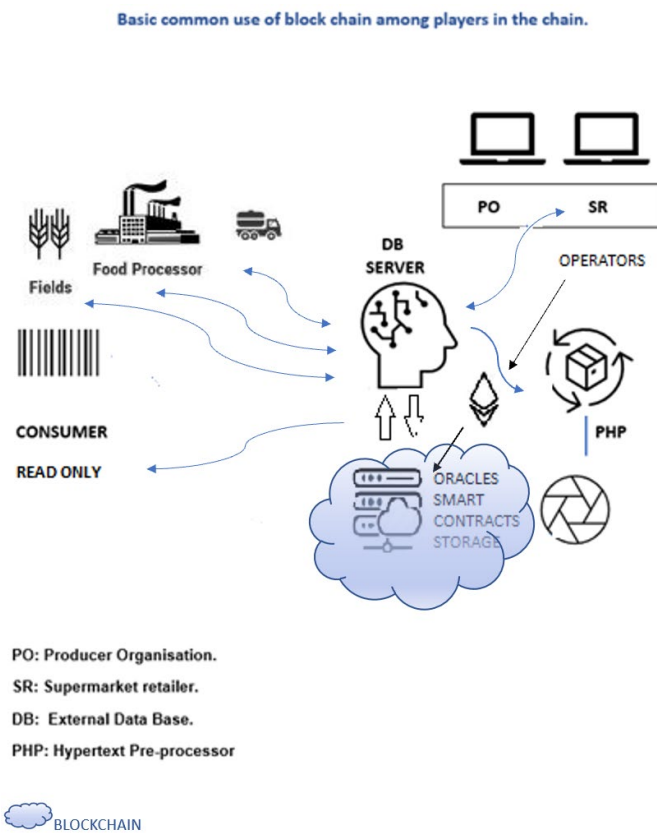


Fig. 5.1 Uso común de blockchain entre los agentes de la cadena

Arquitectura básica del Sistema:

1. Frontend (Interfaz de Usuario):

- **Desarrollado en PHP:** Utiliza PHP para construir la interfaz de usuario que permite a los usuarios interactuar con el sistema. La interfaz incluye formularios para entrada de datos, paneles de control para supervisión y secciones para reportes.

2. Backend (Lógica del Servidor):

- **Servidor PHP:** Maneja las solicitudes de los usuarios, procesando entradas y salidas, y comunicándose con la blockchain.
- **Base de Datos Externa (db):** Almacena información adicional no incluida en la blockchain, accesible para consultas y verificaciones.
- **Oráculos:** Fuentes de datos externas que suministran información relevante y verificada a la blockchain.

3. Blockchain:

- **Almacenamiento de Contratos Inteligentes:** Gestiona y ejecuta contratos inteligentes que automatizan procesos de la cadena de suministro.
- **Nodos de Blockchain:** Incluyen PO y SR que registran y verifican transacciones.

4. Componentes de Seguridad:

- **Autenticación y Autorización:** Uso de mecanismos de autenticación robustos para asegurar que solo usuarios autorizados puedan acceder al sistema.
- **Cifrado:** Cifrado de datos en tránsito y en reposo para proteger la información sensible.

Flujo de Información

1. Registro de Datos por PO:

- Los productores ingresan datos sobre la producción a través de la interfaz PHP. En la mayoría de los casos analizados, las entradas de datos son manuales y se registran en el centro de recepción, lo que resulta en una pérdida de información precisa sobre el origen del producto. Aunque los productores suelen pertenecer a una cooperativa o están registrados en registros agrarios oficiales, estos datos no se reutilizan efectivamente en el proceso, si se introducen la introducción es manual e independiente.
- Estos datos se envían al servidor PHP, que los valida y los registra en la blockchain.

(En el sistema puede haber una o varias transacciones, correspondientes a cada etapa del proceso de producción y distribución y se almacenan en la blockchain)

2. Verificación por SR:

- Los minoristas consultan la blockchain a través de la interfaz PHP para verificar la trazabilidad y calidad de los productos.
- La información almacenada en la blockchain y en las bases de datos externas se combina para proporcionar una visión de la cadena de suministro para que los minoristas y los consumidores verifiquen la autenticidad y procedencia de los alimentos escaneando un código QR

3. Actualización y Consulta de Oráculos:

- Los oráculos envían datos actualizados a la blockchain para mantener la información relevante y precisa.
- Los contratos inteligentes utilizan estos datos para activar condiciones predefinidas, en los casos analizados, la mayoría están dirigidos a validar automáticamente la certificación de origen de los productos¹⁶, garantizando que solo los alimentos provenientes de productores certificados introduzcan información en la cadena de suministro. Esto se logra mediante la comparación de datos registrados en la blockchain con bases de datos externas de certificación

5.1.3 Valoración de los sistemas analizados.

Las primeras deducciones obtenidas de las entrevistas indican que, aunque existe un considerable interés en esta tecnología entre los profesionales del sector en general, aquellos que trabajan en la industria de transformación y distribución están particularmente convencidos de los beneficios de la implementación de blockchain. En relación con la utilidad de blockchain, se menciona que ayuda considerablemente al registro obligatorio de transacciones y a veces, al registro de controles adicionales que garantizan la trazabilidad de la producción en un punto de la cadena donde puede ocurrir fraude (por ejemplo, la preparación de lotes después de una subasta (merluza de pincho), después de la molturación (aceite de oliva), o en el despiece (la industria cárnica)).

Todos los entrevistados, independientemente de la plataforma utilizada, resaltaron las siguientes ventajas comunes en el uso de la tecnología blockchain: inmutabilidad de la

¹⁶ Dentro del ámbito agroalimentario, la tecnología blockchain ha logrado un mayor grado de desarrollo para transacciones B to B, es decir en otros supuestos diferentes a la certificación de condiciones de producción primaria, entre operadores comerciales están utilizando para automatizar varios procesos clave. Por ejemplo: el control de la temperatura de almacenamiento, donde si la temperatura de un envío de alimentos perecederos excede un umbral específico, el contrato inteligente puede desencadenar una alerta a las partes relevantes o cancelar el envío automáticamente para evitar el deterioro del producto. Además, verifican las condiciones de transporte, asegurando que los alimentos se transporten bajo condiciones adecuadas (como temperatura y humedad), y activan pagos solo si estas condiciones se cumplen durante todo el trayecto. También garantizan el cumplimiento de los plazos de producción y caducidad, notificando el retiro de productos que no cumplen con estos criterios, y aseguran el cumplimiento regulatorio, deteniendo automáticamente la distribución de lotes que no pasan inspecciones sanitarias.

información proporcionada, ubicación en tiempo real de los productos, transparencia y visibilidad de la información almacenada en el sistema. Sin embargo, también ven dificultades en su uso como herramienta para certificar condiciones de producción debido a la dificultad de integrar todos los datos requeridos en el sistema. También coincidieron en que, en comparación con otras industrias, la cadena de suministro de alimentos es quizás una de las cadenas más complejas y fragmentadas desde un punto de vista logístico.

Además, los entrevistados coinciden en que la implementación de blockchain hace necesario mejorar la gestión de datos en toda la cadena de valor. Los entrevistados declararon que se espera que la integración de los datos en un sistema blockchain "ponga fin a la falta y la confusión de información". En todos los casos analizados, la blockchain actúa como un sistema de transacciones que "certifica" una serie de datos (que sirven para perfeccionar la transacción) combinada con otras bases de datos externas que no necesariamente están centralizadas. Por lo tanto, el valor de la tecnología radica en garantizar el flujo completo de datos guardados en la blockchain y la información entre empresas en todo el sistema para que pueda convertirse en una referencia. La ventaja competitiva de blockchain sobre otros sistemas es que los datos no pueden ser manipulados y la integración en un sistema descentralizado proporciona una mayor transparencia. La implementación de estos sistemas también ha significado, en todos los casos, una mejora en la recopilación e integración de información de procesos en todo el sistema, ya que los datos deben registrarse de manera completa y adecuada para generar un hash y pasar al siguiente eslabón de la cadena. Lo que obliga a una recogida ordenada de la información.

A partir de los resultados de las entrevistas, se puede deducir que el principal valor de blockchain en comparación con las bases de datos tradicionales es que el sistema garantiza que los datos de producción se registren correctamente y que los almacenados en la blockchain sean, en principio, inalterables.

Un estudio de los proyectos revela que, a pesar de una mejora en la información y transparencia, el uso de blockchain no se ha utilizado para mejorar adicionalmente la gestión de flujos de productos o los atributos de calidad intrínsecos de los productos. Además, salvo Olivacoin¹⁷, el sistema no ha incorporado nuevas formas de venta o creado oportunidades de monetización; todas estas siguen como al principio de la implementación de blockchain. Se considera que un nivel mínimo de rendimiento es una condición necesaria para que los agentes decidan dónde implementar la tecnología blockchain. Por lo tanto, los proveedores no han visto esta tecnología como una herramienta para acceder al mercado minorista, **ya que elementos fundamentales como los estándares de proceso, calidad y relaciones comerciales establecidas entre agentes de la transacción, constituían requisitos previos en los proyectos que se han implementado.**

¹⁷ <https://librebor.me/borme/empresa/blockchain-oliva-coin/>

Como resumen de los puntos anteriores, todos los entrevistados están de acuerdo en que la implementación de la tecnología blockchain en la industria agroalimentaria es compleja, y que el costo y el esfuerzo solo valen la pena y se consolidan cuando hay una necesidad verificada de asegurar la información y los resultados proporcionan alguna ventaja competitiva comercial. Por esta razón, hay un uso cada vez mayor de esta tecnología en la parte logística de la cadena de valor para el control de ciertos parámetros (seguimiento de contenedores y condiciones de transporte internacional) controlando parámetros fácilmente identificables e intercambiables en toda la cadena de valor (temperatura, por ejemplo). En contraste, los proyectos para certificar parámetros de calidad vinculados a las condiciones de producción que involucran a todos los agentes y cubren toda la cadena (desde el productor hasta el consumidor) no se han consolidado. Por lo tanto, aunque todos los agentes apreciaron las virtudes generales de blockchain, también estuvieron de acuerdo en que su implementación efectiva en la cadena logística durante el transporte entre empresas (B-B) es una realidad frente al desafío de implementación en toda la cadena de suministro productor-empresas-consumidor (P-B-B-C).

5.1.4 Estandarización en curso de la tecnología blockchain y los datos en la industria agroalimentaria.

Desde la perspectiva de las prácticas estandarizadas, los entrevistados estuvieron de acuerdo en que para el control logístico ya estaba teniendo lugar una 'normalización' de facto del uso de la tecnología blockchain, lo que la hace muy adecuada para garantizar el control de ciertos parámetros (temperatura, origen, tiempo de almacenamiento de productos alimenticios), proporcionando garantías mejoradas de que los datos no sean manipulados e incluso mejorando el acceso a estos registros, asegurando su disponibilidad y aumentando la velocidad de consulta, si bien existe una necesidad señalada por todos los autores, de estandarización que habría que abordar, que se ha clasificado por prioridades en la tabla 4.3.

En dicha tabla se señalan la interoperabilidad entre diferentes redes blockchain, la seguridad de los contratos inteligentes y el tratamiento de datos (intercambio y protección de datos) como aspectos prioritarios en la estandarización.

En realidad, la interoperabilidad y la estandarización son dos caras de la misma moneda: para apoyar la interoperabilidad de blockchain/DLT, es necesario implementar medidas adicionales tanto mediante regulación como mediante la creación de estándares voluntarios. La regulación puede impulsarse de manera obligatoria, pero también voluntariamente, fomentando la innovación y la colaboración entre diferentes actores del ecosistema blockchain.

En cuanto a la protección de datos y el cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) de Europa, es crucial implementar estándares específicos que aseguren que las soluciones blockchain cumplan con el GDPR. Esto incluye la implementación de medidas de seguridad para proteger los datos personales y asegurar que los procesos de manejo de datos sean transparentes y verificables.

En particular, para el caso particular de las aplicaciones blockchain analizadas para certificar datos de la producción primaria es crucial establecer estándares para el intercambio de datos para asegurar que la información pueda ser compartida y entendida de manera consistente entre diferentes sistemas y organizaciones.

Cuando se aborda la posibilidad de organizar un sistema de seguimiento con tecnología blockchain nos encontramos con una considerable heterogeneidad y tipos de datos que podríamos seleccionar o primar de manera diferente dependiendo del fin perseguido complicando la escalabilidad y la extrapolación del sistema a otros casos similares. Los sistemas que en principio garantizan el mismo parámetro (por ejemplo, origen) están diseñados para alojar diferentes informaciones en diferentes formatos. Por lo tanto, las garantías de identidad, origen y condiciones de producción actualmente ofrecidas por los sistemas blockchain utilizados solo son comparables y tienen el mismo valor en la medida en que utilicen los mismos estándares para la recopilación e integración de datos tanto on-chain como off-chain.

Entre los proyectos españoles analizados, algunos proyectos actualmente en fase de prueba, como Svotan o Iberchain, utilizan fórmulas de procesamiento de datos que pueden extrapolarse a volúmenes de producción relevantes para que puedan ser suficientemente escalables o servir de inspiración para estándares de facto relevantes, aunque en ningún caso se puede considerar que existan estándares armonizados “de Iure”.

Respecto al tratamiento y utilización de datos a través de sistemas blockchain, todas las partes que implementaron estos sistemas estuvieron de acuerdo en que los proyectos mejoraron la recopilación y trazabilidad de los datos gestionados por las diferentes partes involucradas al tener que identificar, ordenar, documentar y registrar datos que identifican las transacciones. Sin embargo, la mayoría de los entrevistados expresaron que, en un sistema que desea garantizar las condiciones de producción de 'la granja a la mesa', todos los miembros de la cadena de suministro deben tener acceso a plataformas digitales, de lo contrario, parte de la información se pierde. Normalmente, las blockchains permiten que se guarde una cantidad limitada de datos. Si hay muchos más datos que deben almacenarse, esto requerirá el uso de un sistema blockchain (datos on-chain) junto con otras bases de datos o servidores que no estén centralmente controlados (datos off-chain).

En todos los casos estudiados, datos ya requeridos por la legislación en materia de control alimentario, se introducen en el sistema (en cadena o fuera de cadena), junto con datos adicionales. Se trata, por tanto, de datos en poder de las administraciones públicas de Europa que ya se han reportado a través de otros canales y formatos. Esta información forma parte del sistema de garantía de calidad y salud de la UE (Hernández San Juan, 2019). Sin embargo, esta información debe introducirse de nuevo en los sistemas blockchain y no puede explotarse automáticamente, vincularse o reutilizarse con aplicaciones privadas, a pesar de ser (o debería ser) la misma información informada a la administración (como registros de tratamientos fitosanitarios, capturas de pesca, notas de transporte o albaranes de entrega).

Las bases de datos existentes también dependen y se informan a diferentes organizaciones públicas o privadas en los diferentes esquemas de calidad de la UE. La falta de centralización y reutilización de datos también son desventajas en términos de su uso o permitir la escalabilidad de proyectos que, en principio, podrían extrapolarse a varias regiones de España. Este es el caso de la trazabilidad de la producción de aceite de calidad, vino, queso y productos cárnicos derivados de ganado extensivo u otros productos que tienen condiciones de producción de gran calidad organoléptica y medioambiental, pero que no pueden diferenciarse en la distribución o antes de llegar al consumidor para explicar la segmentación de precios. Tener que proporcionar la misma información varias veces en diferentes formatos, a través de diferentes canales y a diferentes organizaciones, junto con la falta de centralización y reutilización en general de estos datos o información, es actualmente una inconveniencia en la adopción de cualquier sistema de gestión de información mejorado (incluida blockchain) debido a la burocracia adicional que conlleva.

La posibilidad de partir de datos ya comunicados en los registros oficiales en la construcción de sistemas podría mejorar la estandarización de procesos en cuanto al tratamiento de datos en los sistemas blockchain.

5.1.5 Gobernanza de las implementaciones basadas en blockchain en la industria agroalimentaria.

Una mejor gobernanza de la cadena de valor agroalimentaria entre diferentes partes interesadas es una ventaja potencialmente intrínseca a la tecnología blockchain, gracias a la transparencia, integridad de la información y colaboración abierta que garantiza un modelo descentralizado. Sin embargo, quienes participaron directamente en la implementación de estos sistemas coincidieron en la dificultad de involucrar a todos los operadores necesarios en la introducción de datos y registros adicionales, así como en el esfuerzo adicional que implica mantener el sistema.

Aunque la mayoría de los entrevistados identificaron la gobernanza (en sus diferentes facetas) como un desafío a abordar, pocos propusieron soluciones concretas. Además, como se ha apuntado, existe un interés desigual en la adopción de estos sistemas, dependiendo del rol de los agentes en la cadena.

En primer lugar, en el ámbito logístico y en soluciones B-B, los sistemas blockchain se han integrado como un medio para garantizar las condiciones iniciales y la trazabilidad de tiempos y condiciones de transporte, y son soluciones que están empezando a consolidarse.

En cuanto a las soluciones P-B-B-C, la postura es más escéptica. Los participantes en proyectos reconocieron los beneficios de blockchain para organizar y garantizar la integridad de los datos (al ser ingresados en un momento determinado y no poder alterarse), pero también señalaron la dificultad de involucrar a todos los agentes en el sistema y la baja rentabilidad efectiva de la tecnología para los pequeños productores, considerando el esfuerzo y las demandas de alimentar, implementar o mantener la información.

En segundo lugar, de todos los proyectos piloto identificados, solo en aquellos donde los clientes estaban dispuestos a pagar un precio más alto por productos específicos, trasladando este precio a los productores, se observó un interés real por mantener el sistema en funcionamiento por parte del sector primario.

En los casos estudiados, todos sistemas permitidos (públicos/privados o consorcios), las reglas definidas en el proceso de consenso y a partir de las cuales se decide qué transacciones son válidas (definición de protocolo) afectan a todos los nodos, pero en los casos estudiados, se ha visto que los sistemas funcionan mejor en empresas donde un agente principal controla toda la cadena, desde la producción hasta la venta; algo contrario a la filosofía de consenso que, en principio, subyace a blockchain.

La implementación óptima de tecnologías de registro distribuido entre múltiples entidades requiere que todas las partes acuerden la plataforma elegida y los formatos y procesos de datos a seguir. Un buen sistema de gobernanza, por tanto, implica involucrar a todos los actores relevantes y alcanzar un consenso sobre las condiciones, participación, entrada, permisos, datos guardados (on/off-chain), información proporcionada, oráculos y algoritmos utilizados.

Una vez implementado el sistema y elegido el oráculo y la información registrada, la adopción de blockchain empodera a los desarrolladores o controladores de nodos como el órgano principal detrás de las decisiones empresariales, lo que también genera dudas sobre su adopción. Además, en cuanto a la gobernanza del sistema, los expertos científicos consultados que actuaron como asesores en proyectos destacaron la necesidad de estandarización, previamente señalada. Actualmente, no existen estándares de Iure en el campo de blockchain.

Aunque en el caso específico de la gobernanza, podemos encontrar recomendaciones a nivel ISO sobre la automatización de procesos en situaciones con múltiples participantes, lo que ya supone un primer paso.

5.1.6 Escalabilidad de las implementaciones de blockchain en la industria agroalimentaria.

Los proyectos analizados a través de entrevistas presentan dos problemas de escalabilidad. El primero, ya discutido, se deriva de la falta de estándares (ya sea de facto o de jure), de gobernanza, y también de la heterogeneidad de los datos gestionados fuera de la cadena, lo que dificulta que los pilotos estudiados se puedan extrapolar a casos similares. De hecho, en lo que respecta a la reutilización de los diseños de los sistemas blockchain probados, parece que la mayoría de los proyectos piloto que integran datos de seguimiento de producción/lotes han sido diseñados con una perspectiva individual y no son escalables.

El segundo problema se refiere a la interoperabilidad de plataformas. Al establecer un sistema blockchain entre diferentes organizaciones en un DLT multi-entidad, hay un problema de coordinación. Este problema puede resolverse parcialmente mediante la formación de consorcios. Por ejemplo, en España existe el consorcio Alastria, uno de los más grandes del mundo. Otros consorcios en Europa (Adan) o en América del Sur (b-Connect) están siendo cada vez más activos. Sin embargo, la integración de información a través de consorcios que utilizan el mismo DLT aún no está completa, porque parte de la información que diferencia un producto de otro se pierde en el proceso al no poder extrapolarse.

La integración de la información derivada de las condiciones de producción en un sistema blockchain P-B-B-C es particularmente difícil, ya que cuanto más la información refleje la particularidad específica de un producto y todo el sistema se adapte a situaciones particulares, más condicionada estará la escalabilidad de los proyectos. En contraste, la escalabilidad de sistemas simples (aunque refleje casos particulares) donde la información generada en el proceso es completamente propiedad de cada uno de los agentes relevantes (productores, procesadores, transportistas, distribuidores) y sólo se acuerde sobre unos parámetros que mediante contratos inteligentes se integran en tres o cuatro transacciones es perfectamente posible desde un punto de vista técnico. Sin embargo, el problema de escalabilidad aquí radica en el hecho de que estos sistemas utilizados no cuantan con masa crítica suficiente que ofrezca un impacto económico para estos productores porque el impacto no ha sido suficiente para crear un efecto de marca o promoción que significara que el agente intermedio o el consumidor los reconociera y pagara más por el producto.

En cualquier caso, se puede deducir de las entrevistas que la mayoría de los proyectos completados e implementados con éxito no se han consolidado, y mucho menos se han ampliado. La motivación de los agentes más importantes (los más cercanos a la producción agroalimentaria) para seguir proporcionando información genuina para el sistema blockchain generalmente termina con la financiación pública del proyecto, como se discute en la próxima sección.

Por lo tanto, los encuestados consideraron que la participación de agentes de distribución y marketing a gran escala haría necesario diseñar modelos comunes sencillos que puedan ser adaptables a diferentes regiones geográficas (por ejemplo, aplicables a varias denominaciones de origen o a marcas de calidad diferenciadas en el mismo DLT), lo que permitiría el desarrollo de un tipo de estándar de facto. Además, los estándares y protocolos también impactan en la escalabilidad, ya que deben desarrollarse para organizar/auditar la información que permitiría conectar sistemas DLT aislados.

5.1.7 Coste, disponibilidad y apoyo público.

En términos de disponibilidad de tecnología, hay casos distintos dependiendo del año de implementación del proyecto. En aquellos desplegados en 2018 y 2019, el coste de mantener el sistema se consideraba como una barrera para la introducción, que (dependiendo del número de transacciones almacenadas en la blockchain) los entrevistados estimaron en un costo mensual mínimo de entre 2.500- 3.000 euros al mes de media por organización de productores (OP), difícil de soportar para las pequeñas empresas.

Los proyectos desplegados después de 2020 parecen beneficiarse no solo del apoyo financiero público, sino también de soluciones pertenecientes a la Infraestructura Europea de Blockchain para Servicios (EBSI) y, específicamente en España, del consorcio Alastria que proporciona la tecnología necesaria (los nodos) sin incurrir en costos de transacción. Por lo tanto, una vez que el sistema ha sido desarrollado o implementado, los costos se limitan al mantenimiento del sistema informático requerido. En este sentido, en España, algunos institutos de investigación que trabajan con la industria han desarrollado aplicaciones personalizadas basadas en blockchain.

En cuanto al apoyo público, bajo el título de fondos de recuperación, los planes nacionales suelen agruparse de acuerdo con las directrices europeas para financiar el proceso de transformación digital en España. Este notable apoyo público (Consejo Económico y Social, 2017) ha hecho posible que todos estos proyectos basados en blockchain en la industria agroalimentaria se desarrollen. A partir de 2021, el apoyo económico para el despliegue de tecnologías, especialmente en el sector primario, ha aumentado aún más con el apoyo de los

Fondos Next Generation de la UE. A partir de marzo de 2022, estos tipos de proyectos tendrán aún más apoyo significativo a través de la financiación dirigida por el programa "PERTE Agroalimentario".

De hecho, todos los proyectos identificados, sin excepción, habían recibido algún tipo de financiamiento público, y, en el momento de escribir este documento, hay muchas oportunidades para las PYME agrícolas en cuanto al acceso a ayudas para la modernización tecnológica, que son facilitadas y ofrecidas por algunas de las firmas de consultoría encuestadas. Aun así, y a pesar de lo anterior, los encuestados consideraron que los costos vinculados a la complejidad de iniciar y mantener el sistema blockchain son una barrera para su despliegue. En todos los proyectos destinados a certificar alimentos de alto valor debido a sus condiciones de producción, los agentes en el sector primario y las organizaciones de productores declararon que la implementación de sistemas de gestión de información que utilizaban blockchain había mejorado la transparencia, organización y garantías de la información asociada con estos alimentos. Sin embargo, el esfuerzo adicional requerido y el costo de mantener el sistema no fueron compensados por un precio aumentado para el producto final. Por lo tanto, el fin de la financiación pública, esperado en la mayoría de los despliegues existentes, significará una interrupción de estas prácticas.

En resumen, la disponibilidad y el costo de la tecnología son barreras para su adopción y difusión, y los costos de implementación y mantenimiento son difíciles de soportar para las PYME, especialmente cuando se trata de garantizar las condiciones de producción que no se pueden ver. Por lo tanto, la financiación pública ha sido una condición necesaria para permitir la difusión de la tecnología blockchain, pero la rentabilidad de estas inversiones es incierta al no haberse consolidado proyectos en el ámbito de la certificación de condiciones de producción.

Aunque muchos autores señalan la escalabilidad como el problema central, en realidad es más la complejidad de la implementación, la falta de estándares globales, los altos costos asociados y la resistencia al cambio por parte de los actores involucrados en la cadena de suministro los que presentan las mayores barreras. Aunque los proyectos posteriores a 2020 han contado con mayor apoyo financiero y acceso a infraestructuras como la EBSI y Alastria en España, los costos de implementación y mantenimiento siguen siendo un desafío, especialmente cuando la rentabilidad de estas inversiones es incierta, lo que plantea dudas sobre la sostenibilidad a largo plazo una vez que el financiamiento.

5.2 Examen de las arquitecturas de los sistemas permisionados de blockchain con relación al tratamiento de datos.

De revisión de la literatura realizada se destaca la afirmación generalizada de que la tecnología blockchain ofrece ventajas significativas para la gestión de datos a gran escala, especialmente en sistemas basados en IoT, al mejorar la confiabilidad y la transparencia. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en la organización y manipulación correctas de los datos dentro de estos sistemas.

Esta fase de la investigación ha consistido, mediante el análisis de contenido cualitativo de los estudios identificados que abordaban (bien de manera directa o tangencial esta temática), en la identificación y evaluación de las variables críticas de la arquitectura blockchain relacionadas con la recolección y manejo de datos. La sistematización y estudio académico llevado a cabo se ha descrito en el apartado anterior y a modo de síntesis cabe destacar aspectos como la necesidad de procedimientos confiables para la captura de datos, la importancia de la coherencia del gemelo digital, y los desafíos asociados con el almacenamiento descentralizado de datos. Además, la conformidad con regulaciones como el GDPR y la transparencia en la comunicación de datos son fundamentales para garantizar la verificación y credibilidad de la información proporcionada a los consumidores.

La implementación exitosa de estos sistemas requiere un equilibrio cuidadoso entre la confiabilidad de los datos, la eficiencia de costos, la conformidad con regulaciones y la capacidad de verificación, todo lo cual debe ser abordado mediante una arquitectura bien diseñada y el apoyo de estándares globales. especialmente en lo que respecta a la veracidad, almacenamiento, y manejo de la información.

Confirmar que los datos son precisos, relevantes y pueden ser auditados por terceros de manera transparente es un aspecto crucial de la evaluación de sistemas, en consecuencia: un proceso de auditoría estandarizado para un sistema blockchain en la industria agroalimentaria podría abordar las siguientes áreas críticas para asegurar la integridad, confiabilidad y conformidad del sistema, con base en los resultados del análisis bibliográfico llevado a cabo y descrito en el apartado anterior, un enfoque estructurado de análisis de datos podría adaptarse al siguiente esquema:

1. Examen de la incorporación de datos al sistema, captura automatizada: el sistema blockchain debería proporcionar información sobre el procedimiento que se está utilizando para la incorporación de datos, determinando si se utilizan entradas manuales o automatizadas. La entrada manual de datos, aunque bastante común en la práctica, presenta riesgos de inexactitud y manipulación. La adopción de dispositivos IoT a prueba de manipulaciones podría mitigar estos riesgos al automatizar la captura de datos, garantizando así una mayor confiabilidad. Sin embargo, este enfoque conlleva costos adicionales de software y hardware, lo que puede ser prohibitivo para pequeñas y medianas

empresas (PYME), especialmente en el contexto de un sistema blockchain permissionado (MDPI).

2. **Pertinencia y Coherencia del Gemelo Digital:** La coherencia entre el gemelo digital y el mundo real es otro desafío crítico. Dado que lo que se certifica en la blockchain es una representación digital del producto físico, es crucial que esta representación sea lo más precisa posible para asegurar que los consumidores reciban información confiable y pertinente. Este aspecto se vuelve aún más relevante en la medida en que los productos deben estar etiquetados de acuerdo con sus características reales en el momento de la compra. Comparar los datos del gemelo digital con las características físicas del producto al momento de la auditoría, asegurando que la información proporcionada al consumidor sea pertinente y precisa.
3. **Almacenamiento de Datos y Descentralización:** El almacenamiento de datos en sistemas permissionados de blockchain puede enfrentar limitaciones en cuanto a velocidad y costos, lo que lleva a muchos proyectos a utilizar bases de datos externas para almacenar información, mientras que solo se almacena el hash en la blockchain. Esto plantea desafíos en términos de la integridad y seguridad de los datos, ya que las bases de datos externas pueden no ofrecer el mismo nivel de protección que una solución totalmente descentralizada. Además, la descentralización del almacenamiento puede ser compleja y requiere que todos los participantes en la red estén alineados con respecto a la configuración y los roles dentro del sistema. Revisar cómo se almacenan los datos, si se utilizan bases de datos externas y si solo se almacenan hashes en la blockchain. Verificar la alineación entre los participantes del sistema respecto a la configuración de la blockchain y los roles definidos. La verificación sobre el almacenamiento de datos fuera de la blockchain debe ser igualmente, descentralizado cuando sea posible, y que los datos almacenados fuera de la cadena estén igualmente protegidos frente a manipulaciones.
4. **Comunicación de Datos y Transparencia:** La forma en que la información se comunica a los consumidores finales también es crítica. Aunque tecnologías como códigos QR o etiquetas NFC permiten acceder a datos sobre el origen y condiciones del producto, es esencial que la información esté relacionada directamente con las transacciones almacenadas en la blockchain y no con fuentes externas susceptibles de manipulación. La transparencia es fundamental para evitar prácticas engañosas, garantizando que los datos reflejen con precisión las condiciones de producción. Evaluar cómo se comunica la información de trazabilidad a los consumidores, ya sea mediante códigos QR, etiquetas NFC u otros medios. Verificar que la información está directamente relacionada con las transacciones registradas en la blockchain y que no proviene de fuentes externas manipulables.
5. **Cumplimiento con Regulaciones y Estándares:** La conformidad con regulaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) es un aspecto clave que debe considerarse en el diseño de sistemas blockchain. La naturaleza inmutable de la blockchain plantea desafíos en cuanto a la posibilidad de eliminar o modificar datos personales, lo que

es esencial para cumplir con las normativas de protección de datos. Por lo tanto, el diseño de sistemas debe incluir mecanismos que permitan almacenar datos personales de manera segura, por ejemplo, en “monederos” de usuario, limitando su exposición y garantizando que solo se compartan con el consentimiento éste. Revisar el diseño del sistema para asegurar que cumple con las normativas de protección de datos, incluyendo el manejo seguro de datos personales y el cumplimiento de derechos de los usuarios y asegurar que los datos personales se almacenan y manejan de acuerdo con las regulaciones, y que los usuarios tienen control sobre su información.

Uno de los aspectos más necesarios para una verificación de sistemas y auditoría de datos podría llevarse a cabo mediante obligaciones de comunicación y transparencia de sistemas que permita evaluar fácilmente la credibilidad de un sistema blockchain. Los usuarios deben tener acceso a los datos brutos en la blockchain para poder auditarlos y compararlos con la información proporcionada. Esta verificación cruzada es esencial para asegurar que los datos en la blockchain sean precisos y relevantes, y para evitar la manipulación de información en bases de datos externas no descentralizadas.

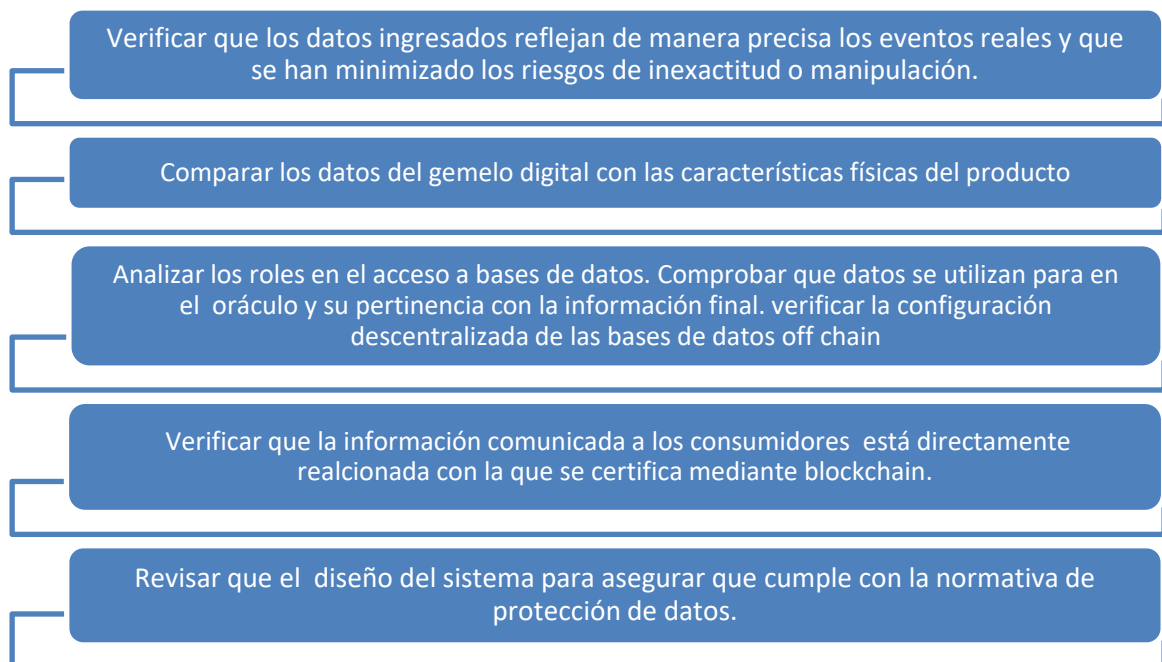


Fig.5.2 Pasos Clave en la Auditoría de Sistemas Blockchain en la Industria Agroalimentaria

5.3 Orientaciones prácticas desde el ámbito público.

Una mejora significativa que podría implementarse, bien, desde el ámbito público o a través de una iniciativa privada conjunta, es la creación de directrices claras para la transparencia que orienten la construcción de sistemas blockchain por parte de los desarrolladores, especialmente para facilitar la auditoría estandarizada de sistemas permisionados en la industria agroalimentaria. Estas directrices deberían abordar aspectos clave como la entrada de datos, la coherencia digital, el almacenamiento, la comunicación de la información, el cumplimiento regulatorio y la autoverificación.

La implementación de procesos de auditoría estandarizados garantizaría que estos sistemas sean confiables, cumplan con las normativas vigentes y mantengan la integridad de los datos en todas las etapas de la cadena de suministro. Este enfoque no solo fortalecerá la adopción de tecnologías blockchain, sino que también asegurará que la información proporcionada sea precisa y veraz, protegiendo tanto a productores como a consumidores.

Por otra parte, y como contrapeso a la afirmación de que “la regulación puede ir en contra de la innovación” (Werbach, K, 2018), se pueden impulsar dos ideas, que parten de este mismo autor:

Medidas que pueden hacer que “la ley se asemeje más al código”. Esto parte de que las regulaciones no sean estáticas, y se combinen simultáneamente con conjunto de instrumentos (reglamentarios) variado. En los Estados Unidos, y también, más adelante en nuestro país se han implementado agencias reguladoras expertas que intervienen para abordar las complejidades de una economía industrial impulsada por la tecnología (CNMV) o el (INCIVE) la intervención de estas agencias podría estimular medidas que hagan una regulación más amigable con el código.

5.3.1 Una regulación más “code-like”

Contratos Modulares:

Denominamos “contratos modulares” a acuerdos legales diseñados para ser altamente flexibles y adaptables. En lugar de ser un documento legal único y estático, un contrato modular se compone de diferentes “módulos” o partes que pueden combinarse, modificarse o intercambiarse según las necesidades del contexto específico. Esta estructura permite que los contratos se adapten fácilmente a cambios en las condiciones, regulaciones o en las relaciones entre las partes involucradas. En un entorno blockchain, los contratos modulares pueden ser implementados como contratos inteligentes, lo que significa que partes del contrato pueden ser ejecutadas automáticamente según las condiciones programadas, reduciendo la necesidad de intervención humana y aumentando la eficiencia y la precisión en su cumplimiento. Por ejemplo, en la Unión Europea, las regulaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) y las

normativas contractuales tradicionales podrían necesitar modificaciones para abordar cómo se manejan los datos personales y las obligaciones contractuales en un entorno de contratos modulares. Estos cambios podrían incluir la necesidad de asegurar que cada módulo del contrato cumpla con las normativas aplicables y que la combinación de módulos no genere conflictos legales o vacíos de responsabilidad.

Fideicomisos de Información (Information Fiduciaries):

Denominamos fideicomisos de información a las entidades o sistemas que actúan como guardianes de la información de los usuarios, asegurando que los datos sean gestionados de manera ética y segura. El concepto se deriva de la idea de "fiduciario", que en el ámbito legal es una persona u organización que tiene la responsabilidad de actuar en el mejor interés de otra parte, generalmente en contextos financieros. Aplicado a la información, un fideicomiso de información se encarga de manejar, proteger y utilizar los datos personales de los usuarios de manera que se respeten sus derechos y se eviten abusos. En el contexto de blockchain, estos fideicomisos podrían ser integrados en la red para garantizar que los datos de los usuarios sean utilizados de acuerdo con principios acordados, como la transparencia y la privacidad, y que estos datos no sean mal utilizados por otras entidades dentro del sistema.

5.3.2 Un código compatible con la legislación vigente:

Al mismo tiempo e inspirado en las teorías de Werbach, se plantea la cuestión de incentivar que el código se asemeje más a la ley. Es decir, al mismo tiempo que el legislador o el regulador podría incentivar que la norma fuera más amigable con el entorno blockchain, los sistemas de registro distribuido podrían ser más accesibles para integrar mecanismos tradicionales de cumplimiento en contratos inteligentes y para integrar procesos de gobernanza similares a los de la ley en las plataformas blockchain.

En la práctica, aunque los contratos inteligentes pueden invocarse ante los tribunales bajo los principios básicos de la legislación mercantil, los contratos ordinarios no tienen las mismas características que los llamados "contratos inteligentes" en blockchain, los cuales cumplen función diferente a la institución fundamentalmente correctiva del contrato tradicional: los contratos inteligentes se utilizan para establecer condiciones y consecuencias previstas ex ante y permitir por ejemplo, con base en estas la consecución de transacciones al asegurar que se perfeccione la transacción al cumplirse dichas condiciones, los contratos legales se utilizan para establecer unas condiciones de transacción que los agentes acuerdan cumplir y se acude a ellos para resolver problemas cuando las cosas no salen según lo planeado. Sin embargo, no hay razón para que los dos mecanismos no puedan coexistir. Las dificultades surgen cuando los contratos

inteligentes y los contratos legales se ignoran entre sí, como ocurrió en el colapso de The DAO¹⁸.

Sin la misma envergadura, porque además partimos de la base de que estamos analizando sistemas permisionados, que ya suponen una condición restringida de participación de los agentes, pero considerando que el ámbito de estudio que nos ocupa está sometido a una hiperregulación, el sistema de producción primaria y el control de alimentos en Europa, tal y como se recoge en los resultados en el apartado anterior. Ignorar esta regulación podría dar lugar a situaciones incoherentes como que se perfeccionaran a través de blockchain transportes no autorizados o que se certificaran bajo sellos de calidad productos que provinieran de explotaciones no dadas de alta en los registros sanitarios oficiales.

Por otro lado, no todos los contratos inteligentes necesitan recogerse como un contrato personalizado y negociado de manera tradicional. De manera equivalente al sistema de contratos vigente es posible utilizar modelos simplificados que permitan establecer criterios de confianza en estas acciones automatizadas. La regulación de agentes, cotejada con registros o declaraciones oficiales, podría eliminar la necesidad de especificar los términos legales en cada contrato inteligente asociado. A medida que los sistemas basados en blockchain puedan aprovechar la información obtenida a través de estas disposiciones y bases de datos oficiales, será posible desarrollar un marco de referencia que compatibilice los acuerdos privados con las disposiciones públicas.

Sistemas de gobernanza:

Quizá uno de los asuntos más difícilmente resolubles en la compatibilidad técnica y legal son los mecanismos de gobernanza en la cadena. En el apartado anterior se recogen los resultados de la encuesta con los expertos, que coinciden en una serie de valores y principios compartidos que deben regir en los sistemas de blockchain como son la transparencia, la apertura y la

¹⁸ El colapso de The DAO (Decentralized Autonomous Organization) en 2016 fue un evento significativo en la historia de las criptomonedas y las plataformas de blockchain. The DAO fue un proyecto innovador basado en la blockchain de Ethereum, diseñado para funcionar como un fondo de capital de riesgo descentralizado que permitiría a los inversores financiar proyectos mediante contratos inteligentes. Sin embargo, el 18 de junio de 2016, un hacker explotó una vulnerabilidad en el código del contrato inteligente de The DAO, lo que permitió drenar aproximadamente 3.6 millones de ether, valorados en unos 70 millones de dólares en ese momento. El problema clave fue un fallo en la función de "reentrancy" del contrato inteligente, que permitía al atacante solicitar repetidamente el retiro de fondos antes de que la transacción original pudiera ser registrada correctamente en la blockchain. Esto llevó a un fuerte debate en la comunidad de Ethereum sobre cómo manejar la situación. Finalmente, la comunidad decidió implementar una "bifurcación dura" (hard fork) para revertir las transacciones maliciosas y devolver los fondos a los inversores originales. Sin embargo, esta decisión fue controvertida y resultó en la creación de dos cadenas de blockchain: Ethereum (ETH) y Ethereum Classic (ETC), donde esta última mantuvo la cadena original sin modificaciones. Este evento subrayó la necesidad de mejorar la seguridad en los contratos inteligentes y marcó un punto crítico en la evolución de la gobernanza en las plataformas de blockchain.

descentralización, fundamentales para la gobernanza colaborativa y equitativa. Los sistemas permissionados ya presentan una cierta “imperfección democrática”, pues la entrada en éstos ya está sometida a una serie de condiciones y aunque limitada a una serie de agentes también adolece de dificultades para poder regular los procesos de participación abierta dentro de este sistema, en particular la propiedad compartida sobre las reglas fundamentales. Esta dificultad se conoce como la “ Paradoja de Vili”¹⁹ y se traduce en que los sistemas que tienen mecanismos bien estructurados para considerar e implementar cambios en las reglas de consenso u otros atributos no son fundamentalmente descentralizados.

Por ejemplo, una aproximación propuesta por algunos autores para resolver el acceso a los datos y conservar la privacidad es la implementación de un sistema de La aproximación propuesta en el artículo sugiere la implementación de un sistema de "Privacidad por Capas" ("Privacy by Layers") que permitiría un acceso controlado a los datos personales, basándose en intereses legítimos, mientras se asegura la protección de la privacidad y el cumplimiento con las leyes de protección de datos. Este sistema permite una gran flexibilidad porque funcionaría otorgando diferentes niveles de acceso a la información almacenada en la cadena de bloques, según la legitimidad del interés del solicitante y las normativas aplicables. Sin embargo, para poder implementar este sistema necesitamos que una entidad centralizada, actúe como controlador de datos, gestione la cadena de bloques y regule el acceso a los datos, permitiendo el acceso a los datos personales solo a aquellas personas u organizaciones que puedan demostrar un interés legítimo, registrando y auditando dicho acceso para asegurar la transparencia y la responsabilidad. Este garantizaría que las actividades de procesamiento de datos dentro de la blockchain cumplan con el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) pero limita el concepto de gobernanza compartida del sistema.

Cuanto más flexibles para adaptarse son menos democráticos y viceversa. La solución definitiva a la paradoja sería tener un sistema de gobernanza que sea tan descentralizado como los propios mecanismos de consenso de blockchain.

Para mejorar la gobernanza on-chain en sistemas de blockchain permissionados utilizados en el ámbito agroalimentario, se podrían implementar varias estrategias clave. Fomentar una mayor participación y representación de todos los actores involucrados en la cadena de suministro es

¹⁹ "Paradoja de Vili" se refiere a la contradicción o dilema dentro de los sistemas de blockchain descentralizados. En estos sistemas, la dificultad para cambiar las reglas fundamentales, como las de consenso, plantea un problema: si los mecanismos para implementar cambios están demasiado estructurados o centralizados, entonces el sistema no es verdaderamente descentralizado. Por otro lado, si no hay una manera efectiva de cambiar estas reglas, el sistema podría volverse rígido e incapaz de adaptarse a nuevas circunstancias o problemas, lo que comprometería su sostenibilidad a largo plazo. La "Paradoja de Vili", por lo tanto, alude a esta tensión inherente entre la necesidad de un gobierno eficaz (que pueda cambiar y adaptarse) y la preservación de la descentralización, que es una de las características fundamentales y valiosas de las redes blockchain.

esencial, lo cual podría lograrse mediante incentivos y sistemas de voto ponderado. Desarrollar mecanismos de gobernanza más flexibles permitiría que los cambios necesarios se realicen de manera gradual y modular, adaptándose a las necesidades específicas del sector agroalimentario sin comprometer la descentralización. En este ámbito y en concreto para el sector agroalimentario, una de las soluciones es la integración de DAOs (Organizaciones Autónomas Descentralizadas) que pueden apoyar la automatización y descentralización de la toma de decisiones, mejorando la eficiencia y transparencia en la gobernanza. También es crucial educar a los usuarios y asegurar la transparencia de los procesos, lo que aumentaría la calidad de las decisiones. La modularidad y la descentralización en el desarrollo de protocolos garantizarían que la gobernanza evolucione de manera equitativa y representativa. Estas mejoras contribuirían a una gobernanza más robusta y adaptativa, capaz de responder a las demandas del sector agroalimentario.

5.3.3 Arquitecturas propuestas.

Orientación Práctica y Desarrollo de un Producto Mínimo Viable (MVP) para el Sector Agroalimentario

Como conclusión de la discusión, la parte final de la tesis tiene como objetivo proporcionar ejemplos en la aplicación de la tecnología hacia soluciones útiles, replicables y escalables. Con estos se pretende ofrecer directrices para el desarrollo de un Producto Mínimo Viable (MVP) de un modelo de datos enfocado a dar trazabilidad a la producción primaria de manera fiable y sostenible económicamente.

De las soluciones estudiadas se proponen dos casos de uso mejorados, los cuales definen las estructuras de datos necesarias para soportar las operaciones fundamentales.

En ambos casos, el primer aspecto a tener en cuenta es que la trazabilidad del producto fresco no se puede abordar con un enfoque basado en la trazabilidad de elementos discretos, dada la dificultad para delimitar dichos elementos.

Por eso, ambos supuestos se centran en la trazabilidad de los procesos que llevan el producto fresco desde la producción hasta el consumidor final. Cada uno de estos procesos, dentro de la red de trazabilidad, cuenta con nodo propietario de su trazabilidad. Cada evento de trazabilidad podrá ser emitido por el nodo propietario o por nodos emisores externos con la aplicación del correspondiente contrato inteligente. También tendremos nodos validadores, que serán los que ofrezcan las garantías y confianza a la red, haciéndola inmune a la manipulación. Estos nodos podrán ser propiedad de diferentes organismos públicos, denominaciones de origen o empresas certificadoras.

Caso 1:

El primer caso se basa en la propuesta de Madrid Rural y el uso de Kore Ledger como tecnología de registro distribuido (no es en pureza “un blockchain” porque hay información que no se replica en todos los nodos). En el proceso se identifican los siguientes eventos:



Fig. 5.2 Proceso de trazabilidad e productos agrícolas

La ontología de datos se construye a partir de la reutilización de bancos de datos agroalimentarios, en concreto el cuaderno de explotación o cuaderno de campo y empleando únicamente los elementos mínimos necesarios para cumplir con su propósito inicial. En otras palabras, es una implementación simplificada del modelo de datos que incluye solo las características esenciales, permitiendo validar su viabilidad y obtener retroalimentación temprana antes de realizar inversiones adicionales en su desarrollo.

La infraestructura propuesta es neutra en relación con la tecnología de registro distribuido, y la conexión con esta se realiza mediante servicios web y API para la integración de los sistemas, de manera que puede comunicarse con otros sistemas y escalar según sea necesario para manejar mayores volúmenes de datos y transacciones. Asimismo, de esta manera, el modelo de explotación de datos es independiente del ledger utilizado, lo que facilita su evolución tecnológica sin comprometer el diseño del sistema. Como se refleja en la figura 5.3 los datos no se replican en todos los nodos, lo que facilita su escalabilidad.

Proceso y Flujo de Datos:

1. **Entrada de Datos:** Los datos de los productores (extraídos del SIEX o del cuaderno de campo) y distribuidores (ej. plataforma Madrid Rural) ingresan al sistema a través de una gateway.
2. **Procesamiento y Almacenamiento:** Los datos son procesados y almacenados en la blockchain y en bases de datos agrarias, utilizando criptografía para asegurar su integridad y privacidad.
3. **Interoperabilidad:** Servicios web y API REST permiten la comunicación e integración con otros sistemas de gestión de la cadena de suministro.
4. **Auditoría y Trazabilidad:** La blockchain garantiza que todas las transacciones son auditables y que los productos pueden ser rastreados desde su origen hasta el consumidor final.
5. **Salida de Datos:** La información trazada y verificada está disponible para los usuarios finales, proporcionando transparencia y reduciendo la necesidad de intermediarios burocráticos.

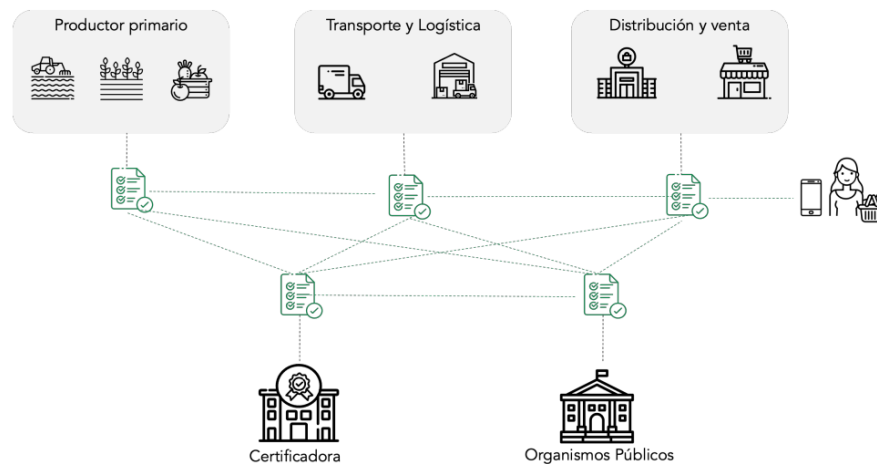


Fig.5.3 proceso y flujo de datos

El proceso de explotación de datos se realiza mediante la reutilización de información ya comunicada en el cuaderno de campo de los agricultores (ver Tabla D.8) para registrar información fidedigna del proceso de producción.

Se capturará información geolocalizada del ciclo de vida de la comercialización y distribución del producto fresco., lo que:

- Evita la necesidad de ingresar manualmente los datos.
- Asegura la coherencia con la normativa legal vigente.

PUNTO CADENA DE SUMINISTRO	TIPOLOGÍA DATO 1	TIPOLOGÍA DATO 2	TIPOLOGÍA DATO 3	VARIABLE
PRODUCCION	INFORMACIÓN GENERAL	DATOS GENERALES DE LA EXPLOTACIÓN	DATOS DE LA EXPLOTACION	Nº de Orden de parcelas
				Nombre ó Razón Social
				NIF
				REA
				SIEX (Sistema de información d elas explotaciones)
				Dirección
				Localidad
				Código Postal
				Provincia
	TITULAR O REPRESENTANTE DE LA EXPLOTACIÓN	Teléfono		
		email		
		Nombre ó Razón Social		
	IDENTIFICACIÓN DE LAS PARCELAS DE LA EXPLOTACIÓN	DATOS IDENTIFICATIVOS Y AGRONÓMICOS DE LAS PARCELAS	REFERENCIAS SIGPAC	Código Provincia
				Término municipal (código y nombre)
				Código agrgado
				Zona
				Polígono
				Parcela
Recinto				
DATOS AGRONÓMICOS			Uso Sigpac	
			Superficie SIGPAC (ha)	
			Superficie cultivada (ha)	
			Especie	
			Variedad	
	Secano/Regadio			
DATOS COSECHA	REGISTRO DE COSECHA COMERCIALIZADA	AGRICULTOR	Aire libre o protegido	
			Sistema de asesoramiento Gestión Integrada Plagas	
			Fecha	
		CLIENTE	Producto	
			Cantidad de producto (kg)	
			Nº de orden parcela/s de origen	
Nº de albarán o factura				
Nº de lote				
Nombre o razón social				
NIF				
Dirección				
Nº de RGSEAA				

Tabla 5.1 extracción de datos del cuaderno de campo.

Aplicación de la Arquitectura en casos de uso reales:

En coherencia con los principios discutidos anteriormente, los ejemplos de arquitectura implementados en dos casos de uso demuestran cómo el uso de bases de datos públicas puede ser aprovechado para:

- Cumplir con la legislación vigente, asegurando la compatibilidad del código con las normativas.
- Simplificar los sistemas de auditoría mediante la utilización de datos ya verificados.



Fig.5.4 Representación de reutilización

- Empoderar a los agentes del sistema, permitiendo que los operadores sean dueños de sus propios datos.
- Implementar sistemas blockchain de manera accesible y eficiente en el ámbito agroalimentario.
- Mejorar la trazabilidad mediante la explotación de bases de datos públicas.
- Reducir la complejidad de la auditoría a través de la reutilización de datos cotejados.

Diseño de Componentes Clave:

Ontología para la Recolección y Tratamiento de Datos: La ontología diseñada servirá como base conceptual para la recolección, almacenamiento y procesamiento de datos a lo largo de la cadena de producción y distribución de productos agroalimentarios. Debe abarcar conceptos, relaciones y categorías relevantes en esta cadena, incluyendo datos sobre la producción, transporte, almacenamiento y distribución. Se enfocará en datos no personales, siendo el número de registro de explotación (parcela) y el lote (venta) dos de las categorías de datos esenciales.

Prototipo de la Capa Blockchain para el Registro de Eventos: Se desarrollará un prototipo de software que implemente una capa blockchain destinada al registro de eventos en la cadena de producción y distribución. Esta capa asegurará la integridad y trazabilidad de los datos recolectados mediante la ontología, registrando eventos clave (siembra, cosecha, transporte, almacenamiento) como bloques en la blockchain. Este diseño será neutro respecto a la tecnología blockchain utilizada, garantizando la interoperabilidad y la evolución tecnológica.

Metodología de Oráculos para la Ingesta Automatizada de Información: Los oráculos servirán como interfaces entre el mundo real y la blockchain, permitiendo la verificación en tiempo real de la integridad de los datos. Estos oráculos se conectarán con fuentes de datos externas y asegurarán que solo información fiable y relevante sea incorporada en la blockchain, facilitando la automatización de procesos a través de contratos inteligentes.

Las fuentes de datos utilizadas en el ejemplo se recogen en el Anexo

Caso 2:

El caso de las flotas españolas: (Bases de datos públicas utilizadas: VMS y Diario de pesca). La entrada de datos, una de las partes más vulnerables en un sistema tecnológico basado en blockchain, puede realizarse de diversas formas. Mientras que la información en la blockchain es virtualmente inmutable, es necesario asegurar que la entrada de datos no sea manipulada.

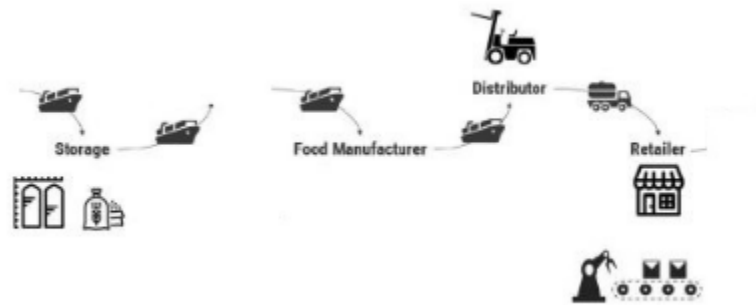


Fig.5.5 Proceso de trazabilidad en productos pesqueros.

La solución que se propone en este caso es la explotada por el sistema “Provenance” mejorada con a través de los cruces con las bases de datos oficiales del sistema VMS y el diario de pesca (representados por las flechas azules). Por ejemplo: solo los pescadores que hayan sido previamente registrados en un censo oficial español pueden ingresar una nueva captura.

En este caso, tenemos dos opciones: embarcaciones con una caja azul (que son rastreadas por VMS) y embarcaciones que no tienen una caja azul; en ese caso, estas embarcaciones deben enviar un mensaje de texto que incluya las coordenadas GPS para evitar problemas con la conectividad a internet en el mar (como el sistema Provenance).

Todos ellos deben registrar su captura sin conexión en el "diario de pesca", que se transmite automáticamente o manualmente a las autoridades españolas.

Los pescadores que deseen participar en el sello deben registrar la venta de su captura en la subasta (mercado de pescado) donde se clasifican y pesan las pesquerías.

La verificación se realiza mediante un algoritmo de aprendizaje automático que analiza la autorización para esta embarcación, las ubicaciones GPS de la embarcación donde se ha realizado la captura en zonas de pesca legales.

Fig 5.4 Ilustración basada en el Sistema "Provenance" con la que se propone la reutilización de datos de los registros pesqueros

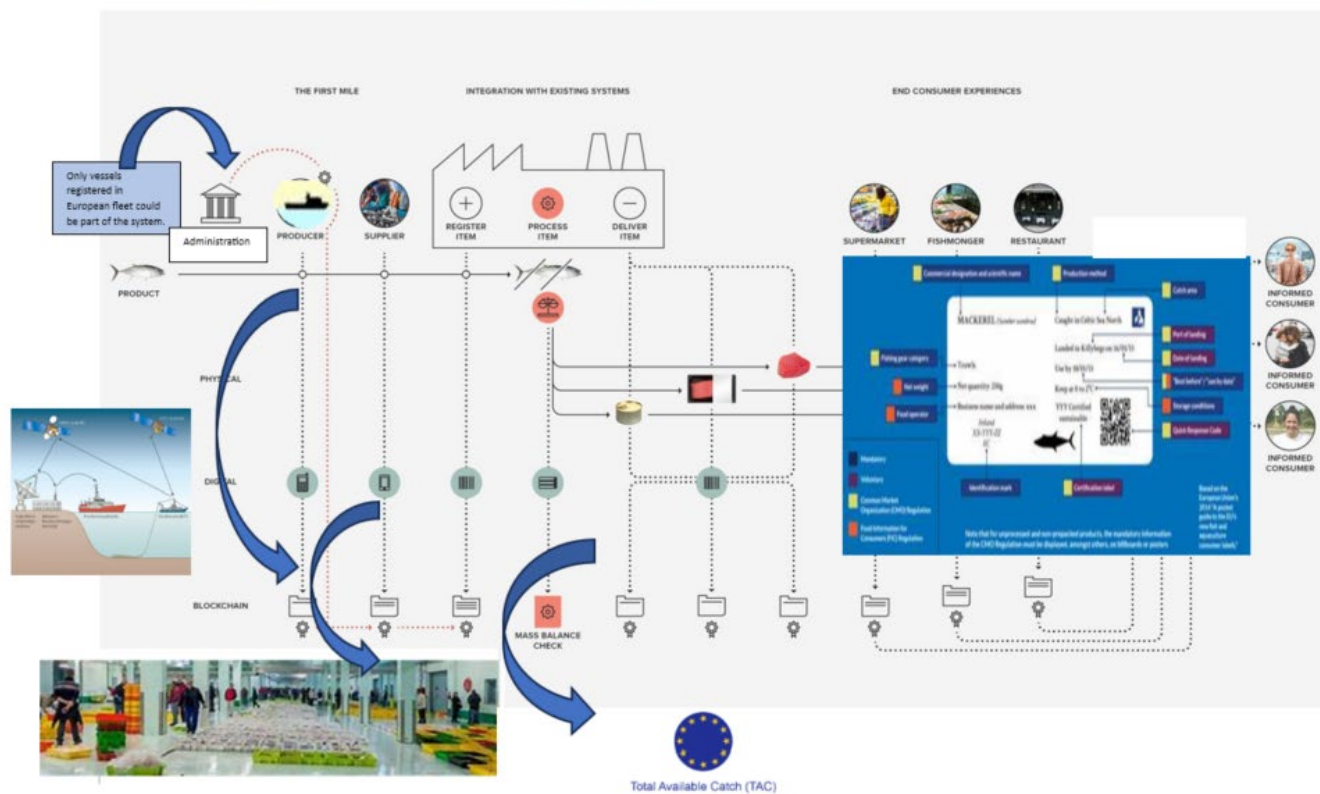


Fig. 5.6 Ilustración sobre la modificación del sistema "provenance" para la reutilización de los registros pesqueros.

Las estrategias para garantizar la validez de la entrada de datos influyen en la integridad de los datos. Por ejemplo, en el caso de las embarcaciones a las que se les asigna una cuota, la cantidad de venta nunca debe exceder la cuota, estableciendo cantidades máximas de un activo que puede registrar una embarcación para que la embarcación solo pueda registrar la cantidad de cuota que legalmente puede pescar. Este tipo de precauciones no solo dificultan el fraude y los errores en la entrada de datos y garantizan que los datos ingresados sean de alta calidad, sino que también ayudan a la vigilancia que deben realizar las autoridades de la administración.

La interacción con la blockchain generalmente funciona a través de una plataforma. En el caso que proponemos, se utiliza una plataforma fuera de la cadena para ingresar datos, gestionar capturas desembarcadas o realizar un seguimiento de ventas y distribución. La plataforma puede ser accedida tanto a través de una aplicación móvil como de un software de computadora y allí se pueden descargar datos de registros oficiales automáticamente, por lo que los pescadores solo necesitan ingresar sus datos una vez para tener el sello.

La plataforma oficial podría estar vinculada con los sistemas centrales estatales oficiales (para

capturas y posición VMS) y los sistemas regionales (datos de venta), pero también debe estar abierta para los datos de los pescadores para completar datos en ciertos casos (embarcaciones que no tienen una caja azul, por ejemplo). El sistema blockchain está construido sobre una plataforma basada en permisos, que limita el acceso a datos para que las empresas siempre permanezcan en control de los datos que han introducido. La plataforma puede localizar productos rápidamente y está diseñada para automatizar la integración de sistemas heredados y datos de red.

Además, está construida como una arquitectura modular, donde los clientes pueden elegir qué componentes desean utilizar siguiendo el ejemplo de otras soluciones comerciales.

Este diseño de plataforma es donde se crea el valor principal para los actores en la cadena de suministro. Dependiendo de su configuración, los actores pueden acceder a información sobre cada producto en segundos.

Este sistema se basa en las siguientes estructuras básicas: es necesario tener almacenamiento descentralizado, contratos inteligentes y una nube perimetral para construir este sistema, como la mayoría de los sistemas diseñados para esas funcionalidades. Sin embargo, algunas ideas son nuevas, en relación con la combinación de blockchain y computación en el borde para mejorar la precisión de los datos proporcionados sobre la producción primaria de productos agroalimentarios.

- La información básica sobre certificados puede almacenarse en contratos inteligentes que se ejecutan en blockchain.
- El sistema blockchain podría basarse en Hyperledger Fabric o en una blockchain compatible.
- Conectar el mundo real a la blockchain necesita ser investigado adecuadamente, pero la verificación cruzada con bases de datos oficiales podría realizarse con conjuntos de datos RDF previamente liberados en la interfaz del productor, para que los productores nunca pierdan el control de sus datos.
- Una solución de trazabilidad alimentaria podría implementarse combinando la plataforma Ethereum y dispositivos IoT que intercambien estándares de mensajes GS1.
- Los activos agrícolas pueden ser tokenizados utilizando tokens ERC-721 (Ali et al., 2023) para realizar una encuesta sobre tecnología blockchain y su seguridad en la cadena de suministro.
- Los contratos inteligentes diseñados en la blockchain Ethereum pueden formar una red de malla para mejorar la trazabilidad de los alimentos, ahorrar costos y mejorar la eficiencia dentro

de las operaciones de la cadena de suministro agrícola.

Capítulo 6

Conclusiones

La tecnología blockchain fue diseñada para proporcionar un registro confiable e inmutable de eventos surgidos de una colección dinámica de partes no confiables. La evolución hacia sistemas autorizados marcó un primer cambio de paradigma, ya que restringen a las personas que pueden participar en la red. En estos casos, una o más entidades controlan la red y, en la práctica, se depende de terceros para realizar las transacciones. Sin embargo, si el sistema en desarrollo trata relaciones contractuales entre participantes, no administra directamente monedas digitales y no hay un único operador en el que todos confíen se ha visto como la blockchain permissionada es la opción típica. El éxito de los sistemas permissionados ha llevado a la proliferación de diferentes proveedores de tokens, plataformas basadas en blockchain de diversos tamaños y reputaciones, así como soluciones de software asociadas o derivadas. Esto ha saturado y confundido el mercado de la tecnología de trazabilidad sin que exista suficiente evidencia científica de la situación actual, de los modelos a seguir y sobre todo de la orientación de las políticas públicas de fomento en nuestro país. La investigación sobre la implementación de la tecnología blockchain en la industria agroalimentaria española ha revelado una serie de hallazgos que señalan tanto las oportunidades como los desafíos de esta tecnología emergente.

Los estudios realizados han puesto el foco en la importancia de una arquitectura de datos bien diseñada, la gestión eficaz de los datos en la blockchain, y las consideraciones regulatorias y operativas necesarias para su adopción en el sector agroalimentario:

1. Situación de la tecnología blockchain en España. Mecanismos disponibles para su implementación.

El uso de la tecnología blockchain parece pertinente para el sector agroalimentario español. Sin embargo, la utilización de blockchain en esta área para certificar las condiciones de producción al consumidor todavía está en sus etapas iniciales y enfrenta una serie de desafíos fundamentales, señalando, como advertencia principal, que el número de casos estudiados y su estado actual (principalmente en fase de prueba) no proporcionan suficiente evidencia para sacar conclusiones definitivas, aunque el gran volumen de información analizada y la coincidencia de los expertos encuestados a través del trabajo en las cuestiones más cruciales se consideran suficientes para extraer las siguientes conclusiones y, sobre todo, proponer nuevas líneas de mejora y trabajo en

el ámbito de las políticas públicas:

La tecnología blockchain en la industria agroalimentaria española para certificar condiciones de producción se encuentra en una fase temprana de adopción, con la mayoría de los proyectos aún en etapa piloto y sin consolidarse de manera significativa. Aunque existe un interés considerable en esta tecnología, particularmente entre los actores de la industria de transformación y distribución, la mayoría de los proyectos no han avanzado más allá de las pruebas iniciales debido a la falta de rentabilidad y las dificultades para escalar las soluciones.

El bajo porcentaje de empresas que mostraron un entendimiento adecuado de la tecnología blockchain durante la encuesta puede indicar que en muchos casos las pequeñas empresas están operando con poco conocimiento de la tecnología. Parece que, incluso en algunos casos, la elección de utilizar esta tecnología deriva de su popularidad y no debido a sus ventajas. Los encuestados incluyeron comentarios como "estaba de moda" o fue, en parte, "vendido por los consultores".

Al mismo tiempo, existe una unanimidad de opiniones en cuanto a que la tecnología Blockchain ofrece ventajas claras, como la inmutabilidad de la información, la transparencia y la trazabilidad en tiempo real, lo que es altamente valorado en la cadena de suministro agroalimentaria. Sin embargo, hay desafíos importantes en la integración de todos los datos necesarios en el sistema, especialmente en un sector tan fragmentado y complejo como el agroalimentario. La implementación de blockchain exige una mejora en la gestión de datos a lo largo de toda la cadena de valor y de apoyo público su se busca asegurar que la tecnología alcance su potencial.

El marco regulatorio europeo en el ámbito agroalimentario, que es muy robusto y que incluye normas estrictas de trazabilidad y seguridad alimentaria, ha podido ser el detonante de la menor consolidación de blockchain en comparación con otras regiones del mundo para la trazabilidad de las condiciones de producción de alimentos. La existencia de complejos sistemas de control y reportes administrativos ha disminuido la necesidad percibida de soluciones basadas en blockchain, dado que muchos de los objetivos de trazabilidad y seguridad ya se cumplen a través de estos controles tradicionales, si bien esto podría dar lugar a concluir que esta tecnología es innecesaria, del estudio se deduce que podemos estar asistiendo a una pérdida de oportunidad para apoyar la implementación de estas regulaciones a través de esta técnica, que es innovadora y puede ofrecer ventajas, por su transparencia, tanto al sector público como al sector privado.

En cuanto a las plataformas y consorcios, herramientas como Alastria y soluciones ofrecidas por IBM, como 'Food Trust', han sido fundamentales en los pocos casos en que blockchain se ha implementado a mayor escala en España. Sin embargo, la mayoría de las soluciones en el mercado son personalizadas y no han logrado la interoperabilidad o estandarización suficiente para permitir una adopción más amplia.

Aunque existe un consenso sobre la necesidad de estándares, ya sea de facto o de iure, aún queda mucho por hacer en esos campos de manera que se facilite la integración y comparación de datos entre diferentes proyectos.

En España se cuenta con condiciones muy ventajosas para la adopción de la tecnología como el despliegue de infraestructuras o la disponibilidad de la ledger (que a menudo puede utilizarse de manera gratuita: caso de Alastria) sin embargo, la rentabilidad de los proyectos está lastrada porque el alto costo de implementación de bases de datos adhoc, su explotación y la integración de datos en el sistema hace que el mantenimiento de estas arquitecturas blockchain haya limitado su consolidación al no generar un valor añadido suficiente para los productores que justifique su mantenimiento, lo que ha llevado a que la mayoría de los proyectos dependa del apoyo financiero público. Sin embargo, una vez que cesa la financiación, muchos proyectos tienden a detenerse, lo que pone en duda la sostenibilidad a largo plazo de estas iniciativas sin un modelo de negocio claro o suficientemente oneroso que mantenga el coste de mantenimiento de las plataformas blockchain.

Además, la escalabilidad de los proyectos de blockchain en la industria agroalimentaria es también un problema debido a la falta de estándares y a la heterogeneidad de los datos gestionados fuera de la cadena. La mayoría de los proyectos son difíciles de extrapolar a otros contextos similares, lo que limita su impacto a nivel nacional y europeo.

En resumen, aunque la tecnología blockchain tiene un gran potencial en la industria agroalimentaria española, su adopción está limitada por desafíos técnicos, regulatorios y económicos. Para que blockchain pueda consolidarse en este sector, será necesario un mayor esfuerzo públicos no sólo de subvención sino de trabajo técnico para el apoyo en la estandarización, interoperabilidad y desarrollo normativo que apoye la creación de modelos de negocio viables que disminuyan o rentabilicen los costos de implementación y mantenimiento.

2. Importancia Crítica de la Arquitectura de Datos en Blockchain.

Para proporcionar trazabilidad desde la granja hasta la mesa, la tecnología blockchain se combina con otras tecnologías que permiten almacenar más datos en el sistema (bases de datos o servicios externos) o recolectarlos automáticamente (IoT).

En el mercado de proveedores de tokens, coexisten plataformas de gigantes con soluciones más pequeñas que ofrecen clasificación. Un análisis de estos proveedores puede realizarse en función del tamaño o la reputación, pero lo más relevante es la evaluación de la tokenización y su papel en el logro del objetivo. El documento identifica desafíos clave y propone soluciones iniciales para la aplicación de la tecnología blockchain en la gestión de la cadena de valor agroalimentaria,

considerando el tipo de arquitectura de datos y tipología de los datos requeridos.

Respecto a los desafíos de implementar la tecnología blockchain en la industria agroalimentaria, se identifica como el desafío más relevante el de la gestión de los datos necesarios para garantizar las condiciones de producción, qué datos se almacenan en la blockchain o fuera de ella y, en particular, el tratamiento de los datos en bruto antes de su registro en la blockchain. Si la recopilación de datos no es correcta, se almacenará información incorrecta en la blockchain, destruyendo todo el objetivo de la implementación. El estudio también destaca la necesidad de integrar fuentes de datos heterogéneas de manera homogénea para permitir la escalabilidad de los proyectos. Otro aspecto relevante relacionado, es que los datos e información proporcionados, integrados y almacenados en el sistema también se suministran, varias veces, en diferentes formatos y a través de diferentes canales, a diversos tipos de registros oficiales por mandato de la legislación europea. En este sentido, la disponibilidad de esta información y su reutilización constituye una oportunidad para la implementación o validación de sistemas blockchain si fuera posible una explotación homogénea y automática de los datos en España y en Europa.

La arquitectura de datos en un sistema blockchain no solo es crucial para garantizar la integridad y seguridad de las transacciones, sino que también juega un papel fundamental en la eficiencia operativa de la cadena de suministro agroalimentaria. Este estudio ha demostrado que una arquitectura bien estructurada permite a los sistemas blockchain gestionar de manera eficaz grandes volúmenes de datos, asegurando que cada transacción esté respaldada por información precisa y verificable. La adecuación de las capas de datos, los flujos de información y el tipo de datos utilizados son elementos que, cuando están correctamente optimizados, permiten a las blockchain proporcionar una infraestructura robusta, segura y descentralizada. Esto es particularmente relevante en el contexto de la trazabilidad de alimentos, donde la capacidad de rastrear y verificar el origen y las condiciones de producción es esencial para cumplir con las expectativas regulatorias y de los consumidores.

Ejemplos como la plataforma IBM Food Trust, que ha sido implementada por grandes minoristas como Walmart, ilustran cómo una arquitectura de datos eficiente puede mejorar la transparencia en la cadena de suministro. En este caso, la arquitectura permite rastrear productos alimentarios desde el origen hasta el punto de venta, garantizando la integridad de la información en cada etapa del proceso. Sin embargo, estos sistemas también han mostrado que la complejidad de la cadena de suministro agroalimentaria requiere soluciones personalizadas que puedan adaptarse a las necesidades específicas de cada segmento de la industria.

Un caso destacado es el de la industria pesquera española, donde se ha explorado el uso de blockchain para la trazabilidad de capturas. Sin embargo, los sistemas analizados, como el de Provenance, muestran que la falta de interoperabilidad y la complejidad en la entrada de datos

manuales han sido barreras significativas para su adopción.

La tesis ha identificado varias variables críticas que impactan directamente la eficacia de los sistemas blockchain en la recopilación y manejo de datos. Estas variables incluyen:

Entrada de Datos (Captura): La captura confiable de datos es esencial para validar la confianza en el sistema blockchain. La investigación destaca que, aunque la automatización mediante dispositivos IoT puede mejorar la precisión de los datos ingresados, esta opción también presenta desafíos en términos de costos y la necesidad de infraestructura adicional. Autores como Bayano-Tejero et al. (2019) y Manning et al. (2022) han propuesto la automatización de la entrada de datos como una solución para mitigar el riesgo de manipulación, pero advierten que esto puede no ser viable para pequeñas y medianas empresas (PYMEs) debido a los costos asociados, por ello la tesis propone una incorporación automatizada de otras fuentes de datos verificadas, como por ejemplo a través de la explotación de bases de datos oficiales. Esta solución que pasa por la explotación de datos oficiales (se han elaborado dos ejemplos con base en el diario de pesca o cuaderno de campo) ofrece también transparencia y verificación, puede constituir también un mecanismo robusto de verificación cruzada, para garantizar que las “llamadas” a las bases de datos off chain incorporen también información verificada. Este diseño, por tanto, garantizaría la transparencia y evitaría prácticas engañosas además de ser mucho más económico en su implementación. Además, una reformulación de la explotación de datos con vista a la sistematización de su captura y su reutilización al ponerla a disposición de los nodos de forma sistematizada permitiría, además de esta explotación a través de sistemas blockchain como los propuestos en la tesis, una forma de validación sistemática para la administración al tener que cruzarse con otros datos externos, reduciendo la burocracia administrativa de control.

Pertinencia y Coherencia del Gemelo Digital: La coherencia entre el gemelo digital y el mundo real es otro aspecto crítico identificado en la investigación. Verificar que el gemelo digital refleje con precisión las condiciones del producto en el mundo real es fundamental para mantener la confianza en el sistema blockchain. Este aspecto está estrechamente relacionado con la demanda de datos y la capacidad del sistema para proporcionar información pertinente al consumidor. La tesis sugiere que se requieren más estudios para entender mejor cómo garantizar la coherencia del gemelo digital en aplicaciones prácticas.

Almacenamiento y Descentralización de Datos: El almacenamiento de datos en blockchain plantea desafíos significativos, tanto en términos de velocidad como de costos. La tesis examina soluciones como el uso de bases de datos externas para almacenar información y solo colocar el hash de los datos en la blockchain, una práctica común en proyectos como TE-Food y FairChain (Köhler & Pizzol, 2020), además se analizan soluciones como Kore Ledger, en las que no toda la información se comparte con todos los nodos. Sin embargo, estos enfoques también introducen vulnerabilidades, ya que el acceso y la seguridad de las bases de datos externas pueden no estar

alineados con los principios de descentralización y seguridad inherentes a la blockchain. La investigación sugiere que la descentralización efectiva del almacenamiento de datos es un desafío complejo que requiere un equilibrio entre seguridad, eficiencia y costo.

Como ejemplo de arquitectura se ofrecen dos soluciones basadas en casos reales: Madrid Rural y Provenance que utilizan dos sistemas DLT diferente: Kore ledger y Ethereum que se han adaptado para incorporar o cruzar datos con los repositorios oficiales.

La comprobación o selección de datos puede hacerse por ejemplo mediante técnicas de intersección de conjuntos privados(PSI) descentralizadas (Arias Paniagua, S. (2023)). Estos datos pueden incorporarse al sistema a través de una gateway que se comunican a través de sistemas web y api rest y permiten la integración en la cadena. En los ejemplos de caso se recomienda que esta estructura se construya de manera que pueda desacoplarse del ledger (blockchain) para que sea neutra a la tecnología utilizada. Las bases de datos desde las que se seleccionan los datos off chain se recomienda que sean también descentralizadas para que ofrezcan mayores garantías de inmutabilidad de los datos.

Además, la tesis aborda la necesidad de desarrollar regulaciones claras que aseguren el cumplimiento de normativas como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) en el contexto de blockchain. La investigación señala que la naturaleza inmutable de la blockchain plantea desafíos importantes en términos de la eliminación o modificación de datos personales, lo que es esencial para cumplir con las normativas de protección de datos. Se propone que los sistemas blockchain incluyan mecanismos de control de acceso y almacenamiento seguro de datos personales, como el uso de “monederos” de usuario, para limitar la exposición de información sensible y garantizar que solo se comparta con el consentimiento del usuario.

3. Rol y orientaciones prácticas en el apoyo a la tecnología a través de políticas públicas.

El apoyo público ha sido identificado como un factor crucial para el desarrollo de proyectos blockchain en la industria agroalimentaria española. La financiación proporcionada a través de fondos europeos y programas nacionales ha permitido el desarrollo de la infraestructura y los recursos necesarios para la implementación de estas tecnologías. Sin embargo, la tesis destaca que este apoyo ha estado predominantemente dirigido a implementar proyectos que no han llegado a pasar de la fase experimental o piloto, lo que para el despliegue completo de soluciones es insuficiente. Su consolidación requeriría un camino de transición que incorporara otras medidas más allá de financiar proyectos piloto: desarrollos tecnológicos, administrativos y legales, como se mencionó, capacitación en esta tecnología.

La tesis incide en el fomento de la reutilización de bases de datos públicas como un factor crucial para incentivar el desarrollo y la implantación de estas soluciones tecnológicas: la actualización

del marco legal y administrativo permitiría que la información oficial que ya se está recopilando, como certificados de origen, diarios de pesca, hojas de transporte, cuaderno de campo y otros datos derivados de controles y documentos oficiales, se reutilizara en el sistema blockchain, como se expone en los casos tipo presentados. Esta es medida , que implica la reestructuración de cómo se explotan actualmente los datos por las administraciones públicas, proporcionaría una utilidad real, al no generar burocracia adicional sino a hacer a los agricultores dueños de sus datos y posibilitar dar un valor añadido a esa recopilación burocrática para poner en valor su producción y al mismo tiempo, ayudar a simplificar los procesos de control relacionados con el registro de identificadores animales y vegetales, intercambiando registros de datos relacionados con la gestión sanitaria y animal y vegetal y producción.

En consecuencia, con el objetivo de conseguir una sostenibilidad y rentabilidad real de la inversión pública en los proyectos para que sirvan para una incorporación de la tecnología y no solo desde el apoyo público inicial a modo de subvención, sería interesante dirigir futuras investigaciones hacia la explotación de datos en el ámbito público y su reutilización para creación de valor, por ejemplo a través de estos sistemas blockchain que podrían ofrecer ventajas competitiva a los productores y la creación de cadenas de valor que apuestan por la calidad y permiten dar respuesta a las demandas de información de los consumidores.

Como resumen de la posible intervención pública, hay muchas líneas de trabajo recomendables para las políticas: desde lo ya comentado relativo a mejorar la reutilización de datos reportados a las administraciones públicas, hasta la concienciación, formación y comprensión de los fundamentos de la tecnología blockchain en un contexto de transformación digital y una escasez de proyectos en formación en habilidades digitales (Palomo-Zurdo & Dopacio Cristina Isabel, 2022). La implementación exitosa de la tecnología blockchain también depende de su capacidad para conectarse a bases de datos existentes y del desarrollo de middleware y protocolos de comunicación para su implementación efectiva.

4. Desarrollo de Estándares Globales:

El desarrollo de sistemas blockchain también necesita de orientación o recomendaciones públicas (o impulsadas desde la iniciativa privada conjunta) que ayuden en la selección e integración de datos de control para crear estándares de facto.

Asimismo, es crucial establecer estándares globales que aseguren la interoperabilidad entre diferentes plataformas blockchain y que faciliten la integración de sistemas existentes con nuevas soluciones tecnológicas, así como normas y directrices claras que definan los estándares mínimos para la entrada, almacenamiento, y verificación de datos dentro de la blockchain. Estas normativas deben ser desarrolladas en colaboración con organismos reguladores, expertos en blockchain, y representantes de la industria agroalimentaria.

Como antes hablamos la revisión de las normas con orientación “code like” es crucial: la creación

de un marco de gobernanza robusto y la adaptación de las regulaciones o su aclaración respecto al desarrollo de sistemas descentralizados que aseguren el cumplimiento de normativas como el GDPR es fundamental para garantizar la adopción y escalabilidad de blockchain en la industria agroalimentaria o Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) y la Ley Modelo de Registros Electrónicos Transferibles de UNCITRAL Asimismo, otras medidas que pueden impulsarse para fomentar la adopción de esta tecnología podrían consistir en la creación de módulos de auditoría estandarizados que puedan ser aplicados en todos los sistemas de blockchain permisionados (algunos ya apuntados en esta tesis con relación a la elección de datos). Estos módulos deberían cubrir aspectos críticos como la entrada de datos, la coherencia entre el gemelo digital y el producto físico, el almacenamiento de datos (on-chain y off-chain), la comunicación de datos a los consumidores, y el cumplimiento con regulaciones como el GDPR.

Establecer un marco común recomendado para asegurar que las aplicaciones cumplan con los mismos estándares, garantizando la interoperabilidad²⁰ y seguridad en la implementación de soluciones blockchain.

Fomentando la creación de estándares voluntarios: Los estándares voluntarios permiten una mayor flexibilidad y adaptación por parte de la industria, fomentando la innovación y la colaboración entre diferentes actores del ecosistema blockchain.

Innovación en Modelos de Negocio: Se necesita desarrollar modelos de negocio apoyados desde las administraciones públicas que generen beneficios económicos tangibles para los actores de la cadena de suministro, lo que es esencial para la sostenibilidad a largo plazo de los proyectos blockchain.

5. Líneas de Investigación

La investigación sugiere varias líneas de trabajo para futuras investigaciones y para la toma de decisiones en la implementación de blockchain en la industria agroalimentaria:

Exploración de Nuevas Tecnologías: La combinación de blockchain con otras tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el Internet de las Cosas (IoT), ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los sistemas de trazabilidad. La utilización de

²⁰ varias plataformas operan de manera aislada, creando "islas digitales" que no pueden comunicarse efectivamente entre sí. Esta falta de interoperabilidad dificulta el intercambio fluido de datos y transacciones entre diferentes sistemas y redes (Trade Finance Global) (RAND Analysis).

tecnologías como IoT y contratos inteligentes para automatizar la verificación de datos es un área prometedora, que incluye la captura automatizada de datos y la validación cruzada de la información con bases de datos oficiales. Esta automatización no solo aumenta la eficiencia, sino que también reduce el riesgo de manipulación de datos.

Desarrollo de Middleware y Protocolos de Comunicación: Con la proliferación de infraestructuras para facilitar el uso de blockchain, el desarrollo de middleware y protocolos de comunicación que puedan integrar sistemas existentes constituye un importante nicho de investigación y desarrollo. Este esfuerzo es clave para el despliegue efectivo de esta tecnología en la industria agroalimentaria.

Recopilación Automática de Datos: Investigaciones actuales están explorando la recopilación automática de datos a través de sensores para evitar la manipulación de datos y la burocracia excesiva (Arroyo-Guardeño David, Diaz-Vico, Jesús, Hernandez Encinas, Luis., 2019). Esta línea de investigación es fundamental para mejorar la integridad y la eficiencia de los procesos en la cadena de suministro agroalimentaria.

Tokenización y Veracidad de la Información: La tokenización, que implica la creación de tokens que representan activos digitales o físicos, es un área emergente con un enorme potencial de investigación en blockchain, estos deben facilitar la representación veraz de la información sobre los productos. En el área específica que nos ocupa se ha señalado como estos tokens, que sirven para certificar las condiciones de producción deben asegurar que la información reflejada sea confiable y verificable. Esto es crucial para garantizar que los consumidores puedan confiar en la autenticidad y la integridad de los productos o servicios vinculados a estos tokens, especialmente en lo que respecta a la verificación de la procedencia y las características del producto. Establecimiento de protocolos de análisis que evalúen la pertinencia y coherencia del Gemelo Digital es un aspecto clave, en la investigación, se ha recogido un análisis que podría aplicarse de cara a abordar el reto de examinar o evaluar que el "gemelo digital" rastreado en la blockchain refleja fielmente el mundo real, algo esencial para garantizar que los productos estén etiquetados de acuerdo con sus características verificables en el momento de la compra.

Almacenamiento de Datos: El almacenamiento de datos en la blockchain puede ser un desafío en términos de velocidad y costos. Muchos proyectos utilizan bases de datos externas para almacenar los datos, colocando solo el hash en la blockchain. La descentralización del almacenamiento de datos puede mejorar la seguridad al evitar un único punto de fallo, pero debe equilibrarse con la eficiencia y accesibilidad de los datos.

Transparencia y Verificación de Datos: La transparencia es esencial para garantizar la credibilidad de los datos en la blockchain. Las tecnologías de blockchain permiten la trazabilidad y verificación de datos, pero es crucial que los consumidores sepan cómo acceder a los datos

brutos para realizar una verificación adecuada. Además, la blockchain puede facilitar el cumplimiento normativo mediante la verificación cruzada con bases de datos oficiales, asegurando que la información proporcionada sea precisa y confiable.

6. Perspectivas Futuras

La tesis concluye que, aunque la tecnología blockchain tiene el potencial de transformar la industria agroalimentaria, su adopción exitosa dependerá de la capacidad para superar los desafíos técnicos, operativos, regulatorios y financieros identificados. Desde una perspectiva de innovación, el éxito de la tecnología blockchain en este sector no se centra tanto en la generación de nuevas oportunidades o innovaciones, salvo por la captura y fiabilidad de datos, ya que las ventajas de la tecnología están bien reconocidas. Más bien, el desafío radica en la difusión de la innovación, que requiere formación, cambio cultural, financiación inteligente, mejores prácticas e historias de éxito. Además, la adopción de blockchain plantea cuestiones relacionadas con la reutilización de la información existente, estandarización y gobernanza, especialmente en escenarios con una diversidad de actores. Invertir en investigación y desarrollo para madurar la tecnología, simplificar las interfaces de usuario y crear aplicaciones amigables puede hacer que blockchain sea más accesible y atractivo para una audiencia más amplia.

Un área crítica de desarrollo futuro, que constituye uno de los hallazgos de esta investigación, es la oportunidad de aplicar una gestión diferente de las bases de datos agrarias mediante el uso de blockchain y criptografía avanzada. Este enfoque no solo mejora la trazabilidad y certificación de calidad en la cadena de suministro agroalimentaria, sino que también aborda la asimetría de información que a menudo perjudica a los productores.

Al permitir que los agricultores sean los dueños de sus datos y aprovechen las bases de datos públicas existentes en España, se les otorga un mayor poder comercial. Esto no solo aumenta su capacidad para poner en valor su producción, sino que también reduce su dependencia de intermediarios, empoderándolos en el mercado.

La tecnología blockchain, en este contexto, actúa como un proveedor de confianza al asegurar que los datos compartidos entre los actores de la cadena de suministro sean seguros, transparentes e inmutables. Esta seguridad se ve reforzada por la gestión descentralizada de los sistemas, que protege los datos de manipulaciones. Este enfoque es particularmente relevante en el marco de las normativas de la Política Agraria Común (PAC) y la legislación de la Unión Europea, que exigen sistemas de certificación de calidad robustos y confiables.

Además, este enfoque está alineado con los objetivos de la Ley de Datos de la UE 2022, que promueve un entorno en el que los datos no personales puedan circular libremente, impulsando la economía de datos y la innovación en Europa. La Ley otorga a individuos y empresas el

derecho de acceder y compartir los datos generados por el uso de productos conectados, un aspecto crucial en el sector agrario, donde los datos son a menudo aportados por los propios agricultores. La explotación de estas bases de datos públicas para fomentar sistemas de certificación de calidad no solo cumple con las exigencias legales, sino que también facilita una mayor equidad en el mercado.

La propuesta de diseño, junto con la integración de sistemas mediante servicios web y API REST, asegura una interoperabilidad efectiva entre diversas plataformas, mejorando así la eficiencia operativa. Los ejemplos muestran sistemas sencillos de reutilización de datos que, al emplear tecnología blockchain para asegurar la integridad de ciertos datos clave, incrementan la transparencia y la confianza en el sistema. La verificación de los datos, a través del cruce con información disponible en bases de datos oficiales, junto con la neutralidad respecto al ledger utilizado, la pertinencia de los datos verificados y la simplicidad del sistema, facilitan una implementación más accesible y económica. Este enfoque es crucial para lograr una adopción generalizada de blockchain en la industria agroalimentaria. Al empoderar a los agricultores con el control de sus datos, se fortalece su posición competitiva, se fomenta la innovación y se garantiza el cumplimiento normativo, alineándose con las políticas europeas para crear una utilización de los datos por aquellos que los generan y en definitiva, un mercado de datos más abierto y competitivo.

Referencias

- Ali, O., Momin, M., Shrestha, A., Das, R., Alhajj, F., & Dwivedi, Y. K. (2023). A review of the key challenges of non-fungible tokens. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122248. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2022.122248>
- Al-Breiki, H., Rehman, M. H. U., Salah, K., & Svetinovic, D. (2020). Trustworthy Blockchain Oracles: Review, Comparison, and Open Research Challenges. *IEEE Access*, 8, 85675–85685. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992698>
- Alfonso, J., & Jiménez, M. (2020). Prueba de concepto para la mejora de la cadena de valor en aceite de oliva virgen mediante el uso de la tecnología blockchain. Unpublished manuscript.
- Alonso, R.S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., & Rodríguez-González, S. (2020). An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 98, art. no. 102047.
- Arroyo-Guardeño, D., Diaz-Vico, J., & Hernandez Encinas, L. (Eds.). (2019). *Blockchain* (1st ed.). CSIC.
- Arias Paniagua, S. (2023). Estudio e implementación de un esquema de PSI (Private Set Intersection) descentralizado [Trabajo Fin de Grado]. Curso 2023-2024. Cotutores: A. I. Gómez Pérez y C. González García.
- Azzi, R., Chamoun, R. K., & Sokhn, M. (2019). The power of a blockchain-based supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 135, 582–592. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2019.06.042>
- Barry, S. (2021). Livestock mobility through integrated beef production-scapes supports rangeland livestock production and conservation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 15. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.549359>
- Barbosa, M. W. (2021). Uncovering research streams on agri-food supply chain management: A bibliometric study. *Global Food Security*, 28, 100517. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100517>

Bayano-Tejero, S., Sola-Guirado, R. R., Gil-Ribes, J. A., & Blanco-Roldán, G. L. (2019). Machine to machine connections for integral management of the olive production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 104980. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2019.104980>

Bell, J. (2010). *Doing your research project: A guide for first-time researchers in education, health and social science* (5. ed). McGraw-Hill, Open Univ. Press.

Berneis, M., Bartsch, D., & Winkler, H. (2021). Applications of blockchain technology in logistics and supply chain management: Insights from a systematic literature review. *Logistics*, 5(3), 43. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/logistics5030043>.

Biswas, S., Kashif, S., Fan, L., Boubakr, N., & Yu, W. (2019). A scalable blockchain framework for secure transactions in IoT. *IEEE Internet Things J.*, 6, 4650–4659. <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2874095>

Borrero, J.D. (2019). Agri-food supply chain traceability for hortofrutícola cooperatives using Blockchain technology. *CIRIEC-España Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa*, (95), 71-94.

Buocz, T., Ehrke-Rabel, T., Hodl, E., & Eisenberger, I. (2019). Bitcoin and the GDPR: allocating responsibility in distributed networks. *Comput. Law Secur. Rev.*, 35, 182–198. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2018.12.003>

Cargill., S. L. (2018). Cargill 2018 annual report. <https://www.bing.com/search?q=Cargill+2018+Annual+Report&cvid=bce3bb614ec0488cafc1b47e77e08c2d&aqs=edge..69i57j0l2.837j0j1&pglt=41&FORM=ANNAB1&PC=U531>

Carrefour. (2018). Notas de prensa Carrefour. <https://www.carrefour.es/grupo-carrefour/sala-de-prensa/noticias2015.aspx?tcm=tcm:5-50248>

Carter, S., & Kumar, V. (2017). 'Ignoring me is part of learning': Supervisory feedback on doctoral writing. *Innovations in Education and Teaching International*, 54(1), 68-75. <https://doi.org/10.1080/14703297.2015.1123104>

Chang, V., Baudier, P., Zhang, H., Xu, Q., Zhang, J., & Arami, M. (2020). How Blockchain can impact financial services: The overview, challenges and recommendations from expert

interviewees. *Technological Forecasting and Social Change*, 158.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120166>

Chang, Y., Iakovou, E., & Shi, W. (2020). Blockchain in global supply chains and cross border trade: A critical synthesis of the state-of-the-art, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 58(7).
<https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1651946>.

Chen, X., Shang, J., Zada, M., Zada, S., Ji, X., Han, H., Ariza-Montes, A., & Ramírez-Sobrinó, J. (2021). Health is wealth: Study on consumer preferences and the willingness to pay for ecological agricultural product traceability technology: Evidence from Jiangxi province China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(22), art. no. 11761.

Choudhary, N. (2020). Contract farming through blockchain technology using smart contracts.
https://www.researchgate.net/publication/347440470_Contract_farming_using_Blockchain_Technology_and_Smart_Contracts

Comisión Europea. (n.d.). Economic sustainability in the CAP.
<https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/economic-sustainability/cap-measures>

Compagnucci, L., Lepore, D., Spigarelli, F., Frontoni, E., Baldi, M., & Di Berardino, L. (2022). Uncovering the potential of blockchain in the agri-food supply chain: An interdisciplinary case study. *Journal of Engineering and Technology Management*, 65, 101700. <https://doi.org/10.1016/J.JENGTECMAN.2022.101700>

Cong, L. W., & He, Z. (2019). Blockchain disruption and smart contracts. *Rev. Financ. Stud.*, 32, 1754–1797. <https://doi.org/10.1093/rfs/hhz007>

Consejo Económico y Social. (2017). Sesión ordinaria del Pleno de 25.03.2017 informe la digitalización de la economía.
<https://www.ces.es/documents/10180/4509980/Inf0317.pdf/a73aa3a8-e669-6c54-72d7-2b74862a56f5>.

Council of the European Union. (2019). Draft Declaration on "A smart and sustainable digital future for European agriculture and rural areas".
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-7085-2019-INIT/en/pdf>

Daoui, S. (2019). GDPR, Blockchain and the French Data Protection Authority: Many Answers but Some Remaining Questions. <https://stanford-jblp.pubpub.org/pub/gdpr-blockchain-france>

Degli-Esposti, S., & Arroyo, D. (2021). Trustworthy humans and machines. In *Trust and transparency in an age of surveillance* (pp. 201–220). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003120827-15>

Dey, K., & Shekhawat, U. (2021). Blockchain for sustainable e-agriculture: Literature review, architecture for data management, and implications. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128254. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128254>

Dybå, T., & Dingsøy, T. (2008). Empirical studies of agile software development: A systematic review. *Information and Software Technology*, 50(9–10), 833–859. <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2008.01.006>

Easterby-Smith, M., Thorpe, R., Jackson, P., & Lowe, A. (2008). *Management research* (5th ed.). Sage.

Eluubek kyzy, I., Song, H., Vajdi, A., Wang, Y., & Zhou, J. (2021). Blockchain for consortium: A practical paradigm in agricultural supply chain system. *Expert Systems with Applications*, 184, 115425. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2021.115425>

Esteban, R., Francisco Luis, B., Pedro Víctor, N., & Valentín, M. (2021). Fundamentals of Blockchain and New Generations of Distributed Ledger Technologies. *Circular Economy Case Uses in Spain. Blockchain Technologies for Sustainability*.

Ethereum. (2022). *Ethereum Whitepaper*. <https://ethereum.org/en/whitepaper/>

European Commission. (2020). *Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic Committee and the Committee of the Regions: A farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0381>

Ferreira, A. G., Oliveira, R. D. S., Quintella, C. M., & Lima, C. P. (2021). Potencial da aplicação de blockchain para a rastreabilidade de cadeias de alimentos sustentáveis: Um

estudo prospectivo. *Cadernos De Prospecção*, 14(3), 981.
<https://doi.org/10.9771/cp.v14i3.38358>

Gad, A. G., Mosa, D. T., Abualigah, L., & Abohany, A. A. (2022). Emerging Trends in Blockchain Technology and Applications: A Review and Outlook. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(9), 6719–6742.
<https://doi.org/10.1016/J.JKSUCI.2022.03.007>

Gartner. (2021). Gartner blog network. <https://www.gartner.com>

Gobierno de España. (2021). Componente 3 PRTR Transformación ambiental y digital del sector agroalimentario y pesquero. Gobierno de España.

Hewa, T., Ylianttila, M., & Liyanage, M. (2021). Survey on blockchain based smart contracts: Applications, opportunities and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 177, 102857. <https://doi.org/10.1016/J.JNCA.2020.102857>

Hernández San Juan, I. (2019). Tecnología blockchain y regulación de la trazabilidad: La digitalización de la calidad y seguridad alimentarias. *Revista General De Derecho De Los Sectores Regulados*, 1.

ISO. (2022). ISO/TC 307. Blockchain and distributed ledger technologies.
<https://www.iso.org/committee/6266604.html>.

Juan, I.H.S. (2020). The blockchain technology and the regulation of traceability: The digitization of food quality and safety. *European Food and Feed Law Review*, 15(6), 563-570.

Kamilaris, A., Cole, I.R., & Prenafeta-Boldú, F.X. (2021). Blockchain in agriculture. *Food Technology Disruptions*, 247-284.

Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640–652.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.034>.

Kitchenham, B. (n.d.). Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in software engineering. <https://www.researchgate.net/publication/258968007>

Köhler, S., & Pizzol, M. (2020). Technology assessment of blockchain-based technologies in the food supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122193. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122193>

Kshetri, N. (2021). Blockchain and sustainable supply chain management in developing countries. *International Journal of Information Management*, 60, 102376. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2021.102376>

Machado, T. B., Ricciardi, L., & Beatriz P. P. Oliveira, M. (2020). Blockchain technology for the management of food sciences researches. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 261–270. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.03.043>

Madakam, S., Holmukhe, R. M., & Jaiswal, D. K. (2019). The future digital work force: robotic process automation (RPA). *JISTEM – J. Inform. Syst. Technol. Manage.*, 16, 1–18.

Manning, L., Brewer, S., Craigon, P. J., Frey, J., Gutierrez, A., Jacobs, N., Kanza, S., Munday, S., Sacks, J., & Pearson, S. (2022). Artificial intelligence and ethics within the food sector: Developing a common language for technology adoption across the supply chain. *Trends in Food Science & Technology*, 125, 33–42. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.04.025>

Marchesi, L., Marchesi, M., Tonelli, R., & Lunesu, M. I. (2022a). A blockchain architecture for industrial applications. *Blockchain: Research and Applications*, 3(4), 100088. <https://doi.org/10.1016/J.BCRA.2022.100088>

Mazzù, M. F., Marozzo, V., Baccelloni, A., & de' Pompeis, F. (2021). Measuring the effect of blockchain extrinsic cues on consumers' perceived flavor and healthiness: A cross-country analysis. *Foods*, 10(6), 1413. <https://doi.org/10.3390/foods10061413>

Mezquita, Y., González-Briones, A., Casado-Vara, R., Chamoso, P., Prieto, J., & Corchado, J.M. (2020). Blockchain-based architecture: A MAS proposal for efficient agri-food supply chains. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1006, 89-96.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2021). La importancia del sector agroalimentario en el escenario de crisis generada por la COVID-19. <https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/servicios/informacion/covid19/Medidas-sector-agroalimentario.aspx>

Mirabelli, G., & Solina, V. (2020). Blockchain and agricultural supply chains traceability:

Research trends and future challenges. *Procedia Manufacturing*, 42, 414–421.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.054>

Mistry, I., Tanwar, S., Tyagi, S., & Kumar, N. (2020). Blockchain for 5G-enabled IoT for industrial automation: A systematic review, solutions, and challenges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 135, 106382. <https://doi.org/10.1016/J.YMSSP.2019.106382>

Mohanta, B. K., Jena, D., Panda, S. S., & Sobhanayak, S. (2019). Blockchain technology: A survey on applications and security privacy Challenges. *Internet of Things*, 8, 100107. <https://doi.org/10.1016/J.IOT.2019.100107>

Nguyen, Q. K. (2016). Blockchain: A financial technology for future sustainable development. Paper presented at the 2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 51–54.
<https://doi.org/10.1109/GTSD.2016.22>

Niknejad, N., Ismail, W., Bahari, M., Hendradi, R., & Salleh, A. Z. (2021). Mapping the research trends on blockchain technology in food and agriculture industry: A bibliometric analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 21.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101272>

Nienaber, A. I., Woodcock, A., & Liotopoulos, F. K. (2021). Sharing data - not with us! Distrust as decisive obstacle for public authorities to benefit from sharing economy. *Frontiers in Psychology*, 11, 576070. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.576070>

Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic Analysis: Striving to Meet the Trustworthiness Criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1).
<https://doi.org/10.1177/1609406917733847>.

Odena, O., & Burgess, H. (2017). How doctoral students and graduates describe facilitating experiences and strategies for their thesis writing learning process: A qualitative approach. *Studies in Higher Education*, 42(3), 572-590. <https://doi.org/10.1080/03075079.2015.1063598>

Öztürk, M., Alonso, R.S., García, Ó., Sittón-Candanedo, I., & Prieto, J. (2021). Livestock welfare by means of an edge computing and iot platform. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1239 AISC, 156-165.

Pakseresht, A., Yavari, A., Kaliji, S. A., & Hakelius, K. (2023). The intersection of blockchain

technology and circular economy in the agri-food sector¹. In *Sustainable Production and Consumption* (Vol. 35, pp. 260–274). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.002>

Palomo-Zurdo, R., & Dopacio, C. I. (2022). ¿Cómo puede incidir en la Economía Social el vector de digitalización de los fondos de recuperación? *CIRIEC*.

Patelli, N., & Mandrioli, M. (2020). Blockchain technology and traceability in the agrifood industry. *Journal of Food Science*, 85(11), 3670–3678. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15477>

Pearson, S., May, D., Leontidis, G., Swainson, M., Brewer, S., Bidaut, L., Frey, J. G., Parr, G., Maull, R., & Zisman, A. (2019). Are Distributed Ledger Technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 20, 145–149. <https://doi.org/10.1016/J.GFS.2019.02.002>

Petersson, D. (2005). Time and technology. *Environment and Planning. D, Society & Space*, 23(2), 207–234. <https://doi.org/10.1068/d349t>.

Qian, J., Ruiz-Garcia, L., Fan, B., Robla Villalba, J.I., McCarthy, U., Zhang, B., Yu, Q., Wu, W. (2020). Food traceability system from governmental, corporate, and consumer perspectives in the European Union and China: A comparative review. *Trends in Food Science and Technology*, 99, 402-412.

Qian, J., Wu, W., Yu, Q., Ruiz-Garcia, L., Xiang, Y., Jiang, L., Shi, Y., Duan, Y., & Yang, P. (2020). Filling the trust gap of food safety in food trade between the EU and China: An interconnected conceptual traceability framework based on blockchain. *Food and Energy Security*, 9(4), art. no. e249.

Riva, G.M. (2020). What Happens in Blockchain Stays in Blockchain. A Legal Solution to Conflicts Between Digital Ledgers and Privacy Rights. *Front. Blockchain*, 3, 36. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00036>

Rivera Camino, J. (2014). *Cómo escribir y publicar una tesis doctoral* (2a edición). ESIC Editorial.

Saurabh, S., & Dey, K. (2021). Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124731. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124731>

- Sezer, B. B., Topal, S., & Nuriyev, U. (2022). TPPSUPPLY: A traceable and privacy-preserving blockchain system architecture for the supply chain. *Journal of Information Security and Applications*, 66, 103116. <https://doi.org/10.1016/J.JISA.2022.103116>
- Sezer, B. B., Turkmen, H., & Nuriyev, U. (2023). PPFchain: A novel framework privacy-preserving blockchain-based federated learning method for sensor networks. *Internet of Things*, 22, 100781. <https://doi.org/10.1016/J.IOT.2023.100781>
- Shuaib, M., Hassan, N. H., Usman, S., Alam, S., Bhatia, S., Mashat, A., Kumar, A., & Kumar, M. (2022). Self-Sovereign Identity Solution for Blockchain-Based Land Registry System: A Comparison. In *Mobile Information Systems (Vol. 2022)*. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2022/8930472>
- Srivastava, A., & Dashora, K. (2022). Application of blockchain technology for agri-food supply chain management: A systematic literature review on benefits and challenges. *Benchmarking: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/bij-08-2021-0495>
- Stranieri, S., Riccardi, F., Meuwissen, M. P. M., & Soregaroli, C. (2021). Exploring the impact of blockchain on the performance of agri-food supply chains. *Food Control*, 119, 107495. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107495>
- Sunny, J., Undralla, N., & Madhusudanan Pillai, V. (2020a). Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106895. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2020.106895>
- Tönnissen, S., & Teuteberg, F. (2020). Analysing the impact of blockchain-technology for operations and supply chain management: An explanatory model drawn from multiple case studies. *International Journal of Information Management*, 52, 101953. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2019.05.009>
- Truong, N. B., Kai, S., Gyu, M. L., & Yike, G. (2019). GDPR-compliant personal data management: a blockchain-based solution. *IEEE Trans. Inform. Foren. Secur.*, 15, 1746–1761. <https://doi.org/10.1109/tifs.2019.2948287>
- Vaghani, A., Sood, K., & Yu, S. (2022). Security and QoS issues in blockchain enabled next-generation smart logistic networks: A tutorial. *Blockchain: Research and Applications*, 3(3), 100082. <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2022.100082>

Werbach, K. (2018). *The Blockchain and the New Architecture of Trust*. United Kingdom: SBN:9780262038935, 0262038935 MIT Press.

Wolfson, R. (2020). Mediterranean aceite de oliva producer uses IBM blockchain to fight food fraud. *Cointelegraph*. <https://cointelegraph.com/news/mediterranean-olive-oil-producer-uses-ibm-blockchain-to-fight-food-fraud>

Xu, X., Weber, I., Staples, M., Zhu, L., Bosch, J., Bass, L., Pautasso, C., & Rimba, P. (2017). A Taxonomy of Blockchain-Based Systems for Architecture Design. 2017 IEEE. International Conference on Software Architecture (ICSA). <https://doi.org/10.1109/ICSA.2017.33>

Xiong, H., Dalhaus, T., Wang, P., & Huang, J. (2020). Blockchain technology for agriculture: Applications and rationale. *Frontiers in Blockchain*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00007>

Yohan, A., Lo, N., & Valentino, K. (2022). A design of secure supply chain management system with blockchain technology. *AIP Conference Proceedings*, 2470(1), id.050009. <https://doi.org/10.1063/5.0080266>

Zhang, J., & Bhatt, T. (2014). A guidance document on the best practices in food traceability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(5), 1074–1103. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12103>

Zhang, Z., Song, X., Liu, L., Yin, J., Wang, Y., & Lan, D. (2021). Recent advances

Anexos

Anexo A

Colección de Artículos

Source	year	Nº	Classification*	Author	Subject/publisher	Research issue	Relevance.	Citations/readers
SCIENCE DIRECT	2019	1	A	(Zhao et al., 2019)	Computers in industry	Blockchain technology in agri-food value chain management:	Appears in first and 4 search. A synthesis of applications, challenges, and future research directions	304/1052
SCIENCE DIRECT	2022	2	B	(Marchesi et al., 2022b)	Blockchain: Research and Applications	A blockchain architecture for industrial applications		2/84
SCIENCE DIRECT	2022	3	A	(Zhang et al., 2022)	Technological Forecasting and Social Change	Critical success factors of blockchain technology to implement the sustainable supply chain using an extended decision-making approach	La mejora del blockchain de la gestión de datos y no viceversa. Blockchain improvements in data management.	5/79
SCIENCE DIRECT	2020	4	B	(Mistry et al., 2020)	Mechanical System and Signal Processing	Blockchain for 5G-enabled IoT for industrial automation:	Appears in first and fourth search. A systematic review, solutions, and challenges	328/766

SCIENCE DIRECT	2021	5	A	(Hewa et al., 2021)	Journal of Network and Computer Applications	Study of many applications that improve the service with the “blessings” of blockchain and smart contracts.	Appears in first and second search. Survey on blockchain based smart contracts: Applications, opportunities, and challenges	1/131
SCIENCE DIRECT	2019	6	A	(Azzi et al., 2019)	Computers & Industrial Engineering	The power of a blockchain-based supply chain.	Appears in first and third search. How the blockchain can be integrated into the supply chain architecture to create a reliable, transparent, authentic, and secure system	3/269
SCIENCE DIRECT	2020	7	A	(Lezohe et al., 2020)	Computers in Industry	Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture.	Appears in first and second search. new 4.0 trends in technologies and Agri-Food Supply Chain Challenges.	274/1072
SCIENCE DIRECT	2020	8	C	(Köhler & Pizzol, 2020)	Journal of Cleaner Production	Technology assessment of blockchain-based technologies in the food supply chain.	how blockchain-based technologies are implemented in food supply chains, as an element in a system of technologies.	116/412
SCIENCE DIRECT	2021	9		(Kshetri, 2021)	International Journal of	Blockchain and sustainable supply	Blockchain in developing	67/346

					Information Management	chain management in developing countries.	countries. How it can institutional deficiencies, transparency can benefit less powerful members in supply chains.	
SCIENCE DIRECT	2023	10	A	(Pakseresht et al., 2023)	Sustainable Production and Consumption	The intersection of blockchain technology and circular economy in the agri-food sector	Scoping review regarding the role of blockchain technology in the transition towards a circular food system. General Study of Block Chain Properties.	1/98
SCIENCE DIRECT	2022	11	C	(Compagnucci et al., 2022)	Journal of Cleaner Production	Uncovering the potential of blockchain in the agri-food supply chain: An interdisciplinary case study	Case study	2/116
SCIENCE DIRECT	2021	12	C	(Saurabh & Dey, 2021)	Journal of Cleaner Production	Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains.	Case study. The paper identified a few potential drivers of blockchain technology adoption and propose an architecture model.	159/625

SCIENCE DIRECT	2021	13	A	(Dey & Shekhawat, 2021)	Journal of Cleaner Production	Blockchain for sustainable e-agriculture:	Appears in third and fourth search. Literature review, architecture for data management, and implications	28/1410
SCIENCE DIRECT	2023	14	C	(Sezer et al., 2023)	Internet of things	PPFchain: A novel framework privacy-preserving blockchain-based federated learning method for sensor networks	The paper identified a few potential drivers of blockchain technology adoption and propose an architecture model using electrochemical sensors.	12
SCIENCE DIRECT		15	A	(Machado et al., 2020)	Trends in Food Science & Technology	Blockchain technology for the management of food sciences researches	It appears in first and fourth search. Literature review	16/107
SCIENCE DIRECT		16	C	(Sezer et al., 2022)		TPPSUPPLY : A traceable and privacy-preserving blockchain system architecture for the supply chain	new framework based on permissioned blockchain architecture that balances anonymity and transparency, ensures traceability and privacy by using on-chain and off-chain smart contracts.	12

SCIENCE DIRECT		17	B	(Eluubek kzy et al., 2021)	Expert Systems with Applications	Blockchain for consortium: A practical paradigm in agricultural supply chain system	A new design is proposed for solve the problems of trustability, scalability, and share amount assignment.	25/121
SCIENCE DIRECT	2022	18	A	(Gad et al., 2022)	Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences	Emerging Trends in Blockchain Technology and Applications: A Review and Outlook	Literature review favorite publication venues, the hottest research areas, about the status quo and emerging trends and frontiers of Blockchain	17/176
SCIENCE DIRECT	2022	19	C	(Manning et al., 2022)	Trends in Food Science & Technology	Artificial intelligence and ethics within the food sector: Developing a common language for technology adoption across the supply chain	How AI applications are increasingly being adopted in food supply chains.	6/92
SCIENCE DIRECT	2019	20	C	(Bayano-Tejero et al., 2019)	Computers and Electronics in Agriculture	Machine to machine connections for integral management of the olive production	Case study	5/47
SCIENCE DIRECT	2019	21	A	(Mohanta et al., 2019)	Internet of things	Blockchain technology: A survey on applications and	bibliographic research	211/466

						security privacy Challenges		
SCIENCE DIRECT	2020	22	A	(Sunny et al., 2020b)	Computers & Industrial Engineering	Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration	Case study based in an overview of the various blockchain- based traceability solutions reported in the literature.	158/534
SCIENCE DIRECT	2020	23	C	(Tönnissen & Teuteberg, 2020)	International Journal of Information Management	Analyzing the impact of blockchain- technology for operations and supply chain management: An explanatory model drawn from multiple case studies	“The blockchain lead not to the removal of intermediaries in operational supply chains”	193/710
SCIENCE DIRECT	2019	24	C	(Pearson et al., 2019)	Global Food Security	Are Distributed Ledger Technologies the panacea for food traceability?	It provides an overview of the application of distributed ledger technology (DLT) within the food chain.	113/359

Tabla A.1 colección de artículos

Anexo B.

Principales disposiciones en materia de control y monitoreo que requieren el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.

BOE
Reglamento (CE) n.º 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria.
Directiva 2001/95/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 3 de diciembre de 2001, sobre la seguridad general de los productos.
Ley 17/2011, de 17 de julio, sobre seguridad alimentaria y nutrición.
Real Decreto 1808/1991, de 13 de diciembre, por el que se regulan las menciones o marcas que permiten identificar el lote al que pertenece un producto alimenticio (BOE 25 de diciembre de 1991).
Real Decreto 2207/1995, de 28 de diciembre, sobre la higiene de los productos alimenticios (BOE 27.02.1996), resultado de la transposición de la Directiva 93/43/CEE.
Real Decreto 479/2004, de 26 de marzo, por el que se establece y regula el Registro General de Explotaciones Ganaderas.
Real Decreto 728/2007, de 13 de junio, por el que se establece y regula el Registro General de Movimientos de Ganado y el Registro general de identificación de animales individuales.
Real Decreto 1614/2008, de 3 de octubre, relativo a los requisitos de sanidad animal de los animales y productos de la acuicultura, así como a la prevención y control de determinadas enfermedades de los animales acuáticos.
Registro Electrónico de Transacciones y Operaciones con Productos Fitosanitarios (RETO) establecido por el Real Decreto 285/2021, de 20 de abril.
Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios, modificado por el Real Decreto 1050/2022, de 27 de diciembre, que modifica el Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, que establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de productos fitosanitarios.
Base de datos PROLAC. Real Decreto 95/2019, de 1 de marzo, por el que se establecen las condiciones de contratación en el sector lácteo y se regulan el reconocimiento de organizaciones de productores y organizaciones interprofesionales en el sector.

Sistema ARCA regulado en el Real Decreto 45/2019, de 8 de febrero, por el que se establecen las normas zootécnicas aplicables a los animales reproductores de raza pura, cerdos híbridos y su material reproductivo, actualizando el Programa Nacional de conservación, mejora y fomento de las razas ganaderas.
Sistema informático para el registro de establecimientos de alimentación animal. Real Decreto 629/2019, de 31 de octubre.
Sistema ECOGAN creado por el Real Decreto que regula el registro general de las mejores técnicas disponibles en granjas y el apoyo para el cálculo, monitoreo y notificación de emisiones en la ganadería.
Registro Nacional de Organizaciones de Productores y Asociaciones de Organizaciones de Productores regulado en el Real Decreto 532/2017, de 26 de mayo.
Registro Estatal de organizaciones y asociaciones de organizaciones de productores de tabaco crudo a que se refiere el Real Decreto 969/2014, de 21 de noviembre, que regula el reconocimiento de organizaciones de productores, la extensión de normas, las relaciones contractuales y la comunicación de información en el sector del tabaco crudo.
Registro Nacional de Organizaciones y Asociaciones de Organizaciones de Productores de leche regulado en el Real Decreto 95/2019, de 1 de marzo.
Registro Nacional de Organizaciones y Asociaciones de Organizaciones de Productores previsto en el Real Decreto 541/2016, de 25 de noviembre, que regula el reconocimiento de organizaciones de productores y sus asociaciones en el sector cunícola.
Sistema de Información del Mercado del Sector Vitivinícola del Real Decreto 739/2015, de 31 de julio.
Sistema de información unificado del sector lácteo regulado en el Real Decreto 319/2015, de 24 de abril, sobre declaraciones obligatorias a realizar por los primeros compradores y productores de leche y productos lácteos de vacas, ovejas y cabras.
Sistema REGMAQ: Real Decreto 448/2020, de 10 de marzo, sobre caracterización y registro de maquinaria agrícola.
Sistema de información de los mercados de aceite de oliva regulado en el Real Decreto 861/2018, de 13 de julio, por el que se establecen las normas básicas sobre declaraciones obligatorias en los sectores del aceite de oliva y aceitunas de mesa.
Real Decreto 1054/2021, de 30 de noviembre, por el que se establece y regula el Registro de operadores profesionales de plantas, las medidas que deben cumplir los operadores profesionales autorizados para emitir pasaportes fitosanitarios y las obligaciones de los operadores profesionales de material vegetal de reproducción, y se modifican varios reales decretos en materia de agricultura.
Otras fuentes de datos

Los datos de la solicitud de ayudas de la PAC establecidos en el Real Decreto 1075/2014, de 19 de diciembre, derogado por el Real Decreto 1048/2022, de 27 de diciembre, sobre la aplicación, a partir de 2023, de intervenciones en forma de pagos directos y el establecimiento de requisitos comunes en el marco del Plan Estratégico de la Política Agraria Común, y la regulación de la solicitud única del sistema de gestión y control integrado.
Los datos relacionados con los pagos de los fondos agrícolas europeos, FEAGA y FEADER, recopilados en base a lo dispuesto en el Real Decreto 92/2018, de 2 de marzo.
Sistema TRACES (Sistema de Control y Certificación de Comercio y Expertos), una herramienta web de certificación veterinaria utilizada por la Unión Europea para controlar la importación y exportación de animales vivos y productos de origen animal dentro y fuera de sus fronteras.
Real Decreto 1045/2022, de 27 de diciembre, sobre derechos de apoyo a la renta básica para la sostenibilidad de la Política Agrícola Común.
Real Decreto 1046/2022, de 27 de diciembre, que regula la gobernanza del Plan Estratégico de la Política Agrícola Común en España y de los fondos agrícolas europeos FEAGA y FEADER.
Real Decreto 1047/2022, de 27 de diciembre, que regula el sistema de gestión y control de las intervenciones del Plan Estratégico y otras ayudas de la Política Agrícola Común.
Real Decreto 1049/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen las normas para la aplicación de condicionalidades reforzadas y condicionalidades sociales que deben cumplir los beneficiarios de las ayudas de la Política Agrícola Común que reciben pagos directos, ciertos pagos anuales de desarrollo rural y el Programa de Opciones Específicas por Lejanía y la Insularidad (POSEI).
Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en suelos agrícolas.
Real Decreto 1054/2022, de 27 de diciembre, por el que se establece y regula el Sistema de Información para explotaciones agrícolas y ganaderas y la producción agrícola, así como el Registro Autónomo de explotaciones agrícolas y el Registro Digital de Explotaciones.

Tabla B.1 Principales disposiciones en materia de control y monitoreo que requieren el registro y la explotación de datos derivados de la producción agroalimentaria en España.

Anexo C

Cuestionarios

Fecha de entrevista: _____
Nombre del entrevistado: _____
Nombre de la compañía: _____
Departamento: _____
Posición: _____
Años de experiencia: _____

PARTE A: INTRODUCCIÓN

Introducción: Gracias por su tiempo para contribuir a esta investigación. Explicaré brevemente mi papel, el objetivo de este estudio de investigación y cómo se llevará a cabo la entrevista.

El propósito de la investigación es analizar el grado de conocimiento en España sobre la tecnología blockchain aplicada a la cadena agroalimentaria y la percepción que existe su posible utilidad.

Además, queremos conocer las ventajas o desventajas que se observan por parte de los actores que han participado de experiencias de uso de sistemas basados en blockchain y las ventajas /oportunidades y dificultades/desafíos que han observado en relación con la implantación de la tecnología.

Asimismo, en la utilización de la tecnología de la cadena de bloques a su caso concreto nos interesa conocer que "prueba de concepto" se utiliza para perfeccionar el algoritmo y qué intereses satisface de las que están involucradas en la cadena.

Confidencialidad: La información obtenida de esta entrevista es confidencial. Los datos adquiridos serán utilizados de manera agregada y con el único objetivo de documentar este estudio y no se transmitirán a terceros. El nombre de su empresa, su nombre y cualquier otro será tratado de manera confidencial y se codificará la información que lo identifique a usted o a su empresa.

Puede contactarme a través del siguiente número de teléfono: 615XXXXX

La parte B y C contienen las preguntas concretas planteadas a los distintos grupos de agentes.

PARTE B: GUÍA DE ENTREVISTA PARA EMPRESAS QUE PODRÍAN ESTAR INTERESADAS O ESTÁN YA UTILIZANDO TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN.

Preguntas generales

1. ¿Puede describir brevemente su puesto dentro de su empresa?
2. ¿Cuál es el negocio principal de su empresa?
3. ¿Puede describir brevemente el papel de su empresa dentro de la cadena de suministro agroalimentario?
¿dentro de la cadena en qué tipo de actividades están involucrados?
4. ¿Qué actividades / procesos necesitan de una tecnología de encriptado/seguridad de los datos? ¿cuáles son los aspectos más y menos importantes en el proceso de valor de los productos con los que trabajan?

Forma actual de trabajar

5. ¿En qué parte del proceso se identifican la mayoría de los problemas / desafíos?
6. ¿Qué tipo de problemas se perciben en este momento para la cadena de suministro agroalimentario? (Gran cantidad de documentación, ineficacia, colaboración, retrasos, problemas de comunicación, datos / TI, ¿otros?)
7. ¿Qué tipo de problemas se ven mejorados con el empleo de la tecnología blockchain? ¿Consecuencias?
8. ¿Qué actividades pueden y deben ¿mejorarse ?, ¿cómo se pueden mejorar?
9. ¿Qué tipo de mejoras en relación con la comunicación/documentación o digitalización de la cadena de suministro agroalimentario se han realizado en los últimos años? ¿Fueron exitosas? ¿Por qué y por qué no?

Preguntas de seguimiento relacionadas con la documentación

10. ¿Qué tipo de documentación se necesita / se prepara para los envíos?
11. ¿Cómo se percibe el proceso de documentación en su organización?
12. ¿Cuánto tiempo se dedica a verificar / preparar documentos? ¿Es posible estimar esto en costos?
13. ¿En qué medida cree que la forma actual de trabajar en materia de documentación es suficiente para el futuro? (Para seguir siendo competitivo / exitoso)

Preguntas de seguimiento relacionadas con la comunicación

14. ¿Cómo percibe la cantidad de comunicación necesaria con otros actores de la cadena de suministro agroalimentario?

15. ¿Cómo percibe la colaboración a lo largo de la cadena para realizar/recibir pedidos con éxito?
16. Preguntas relativas a la incorporación de Tecnologías de la Información a la cadena de suministro agroalimentario.
17. ¿Cómo describiría el panorama actual de las tecnologías de la información? ¿Es suficiente?
18. ¿En qué medida las tecnologías de la información que están utilizando son suficientes para permitir un seguimiento o recabar la información de los procesos realizados? (Datos disponibles, interfaces con otros sistemas, etc.)
19. ¿Qué opina sobre la digitalización comercial de la cadena de suministro agroalimentario?
20. ¿Hasta qué punto es necesaria la digitalización del comercio?
21. ¿Qué le gustaría lograr en los proyectos de digitalización? ¿Qué aprendió de los proyectos de digitalización ejecutados en el pasado?

Preguntas de seguimiento relacionadas con la estandarización

22. ¿Conoce algún proceso de estandarización en su ámbito? ¿participa del mismo?
23. ¿Forma parte de iniciativas internacionales para mejorar la logística?
24. ¿Ha adoptado algún tipo de estándar o procedimiento de uso común? ¿en qué ámbito: nacional/europeo/internacional?
25. ¿Cuál es la fuente de su conocimiento tecnológico aplicado a estandarización? ¿Cómo se mantiene al día?

Conocimiento e interés sobre la tecnología blockchain.

26. ¿Qué sabe sobre la nueva tecnología blockchain? (¿Qué tipo de aplicaciones de blockchain conoce? (Instituciones financieras, bitcoin, etc.) ¿Cuándo surgió por primera vez su interés en blockchain?
27. ¿Ha cambiado su interés en blockchain con el tiempo?
28. ¿Qué tipo de oportunidades le ofrecen las soluciones basadas en blockchain? ¿Cuáles considera que son las características más importantes / interesantes que ofrece la tecnología blockchain? (Descentralizado, inmutabilidad, consenso, transparencia, contratos inteligentes, escalabilidad, etc.) frente a otras tecnologías?

Específicamente para su empresa, ¿de qué manera la tecnología blockchain sería beneficiosa / no beneficiosa?

29. ¿participa en un proyecto donde implementar blockchain? ¿Está involucrado en el proceso de implementación? ¿Cómo promotor/colaborador? ¿se trata de un proyecto internacional /nacional/local?

¿Ve posibles limitaciones para la tecnología en su cadena de suministro agroalimentario?

30. ¿Por qué te interesa implementar blockchain en tu empresa?

31. ¿Cómo le gustaría implementar blockchain en tu empresa?

32. ¿Cuáles han sido sus experiencias con empresas que ofrecen soluciones blockchain?

33. ¿Cómo son sus relaciones con sus socios de la cadena de suministro agroalimentario?

34. En la literatura, muchos investigadores afirman que las empresas en una colaboración a menudo enfrentan con problemas en relación con el intercambio de información y la falta de confianza.

- ¿Cuáles son sus experiencias con estos desafíos?
- ¿Tiene algún problema con el intercambio de información?
- ¿Tiene problemas de confianza?
- ¿Ve alguna posibilidad de cómo blockchain podría afrontar estos problemas de colaboración?
- ¿En qué medida espera que blockchain resuelva los problemas mencionados anteriormente u otros? ¿qué problemas?

35. Si pudiera desarrollar una plataforma blockchain conforme a sus necesidades, ¿qué requisito consideraría importante incluir?

36. ¿Qué cree que cambiará en su negocio al adoptar una tecnología tan nueva como

37. blockchain?

- ¿Hasta qué punto cree que su empresa está preparada para adoptar una nueva tecnología como blockchain?
 - ¿En qué período de tiempo?
 - ¿Qué barreras debe superar su empresa para estar preparada?

- ¿Qué aspectos considera motivadores para adoptar blockchain?
 - ¿Por qué no implementaría la tecnología blockchain en su organización y por qué?
38. ¿Alternativas para la tecnología blockchain? ¿Hasta qué punto su empresa siente la necesidad de involucrarse en proyectos de digitalización / blockchain para permanecer competitivo en el futuro?
 39. ¿En qué condiciones o bajo qué supuestos participaría su empresa en una gran plataforma blockchain?
 40. ¿Qué vías de apoyo o de financiación conoce para la transformación tecnológica de su empresa? ¿se han financiado inversiones o experiencias de implementación de tecnología blockchain con cargo a los fondos europeos?
 41. ¿Qué otro agente me recomendaría que contactara al objeto de conocer mayores detalles del impacto o la utilidad del blockchain en las cadenas de suministro en España?

PARTE C: GUÍA DE ENTREVISTA PARA AGENTES DEL SECTOR PÚBLICO/ACADEMIA.

1. ¿Conoce la tecnología blockchain? ¿sus usos? ¿y sus posibles aplicaciones a la cadena de suministro agroalimentario?
2. ¿conoce experiencias o personas en su entorno que estén utilizando esta tecnología?
3. ¿Cuándo surgió por primera vez su interés en blockchain?
4. ¿ha trabajado/impulsado/analizado/participado directamente en algún proyecto o estudio que utilice la tecnología blockchain? ¿podría describir brevemente en qué consistía?
 - 4.1) ¿qué utilidad concreta prestaba esta tecnología?
 - 4.2) ¿ha intervenido /supervisado algún proyecto que utilice esta tecnología?
5. ¿Con qué tipo de proyectos/expedientes trabaja? (sector/ industrias /ámbito académico etc.)
6. ¿Qué experiencia puede transmitir sobre opiniones de terceros en relación con el uso de blockchain?
7. ¿en su entorno, puede decir que ha cambiado el interés por el uso del blockchain con el tiempo?

Soluciones blockchain en cadenas de suministro agroalimentario.

8. ¿Conoce la utilidad la tecnología blockchain en la cadena de suministro agroalimentario?

9. ¿Qué conocimiento tiene con las aplicaciones blockchain en las cadenas de suministro agroalimentario? ¿nacionales/internacionales? ¿sectores? ¿utilidad? ¿ámbito académico/industrial/experimental?
10. ¿Qué tipo de oportunidades señalaría en relación con las soluciones blockchain en las cadenas de suministro agroalimentario?
11. ¿Cuáles son las limitaciones de esta tecnología en las cadenas de suministro agroalimentario?
12. ¿en su opinión, qué industrias específicas que podrían estar especialmente interesadas en la tecnología?
13. ¿conoce/existe/ha utilizado algún sistema de financiación con cargo a fondos europeos para apoyar el proceso transformador de las empresas?

Razones para implementar la tecnología blockchain

14. ¿sus administrados/ alumnos/ investigadores ya tienen una idea de cómo implementar la tecnología blockchain?
 - 14.1) ¿Conocen áreas problemáticas específicas que la tecnología podría resolver?
 - 14.2) ¿A la hora de lanzar un proyecto, necesita identificar primero la utilidad que esta tecnología podría tener para el mismo?
15. En la literatura, muchos investigadores afirman que entre las relaciones empresariales que se producen en la cadena de suministro y distribución alimentaria a menudo surgen problemas en el intercambio de información y también problemas de confianza. (por ejemplo, en materia sanitaria/origen/garantía de pago/falsificación de producto) ¿cree que en España existen esos problemas?
 - 15.1) ¿Cuáles son sus experiencias con estos desafíos? ¿nacionales/internacionales?
 - 15.2) ¿Ve otros problemas en las cadenas de suministro agroalimentario que podrían resolverse? ¿a través de blockchain?
16. ¿Ve posibilidades del uso de blockchain para resolver problemas de confianza?
17. ¿Cuándo evalúa o analiza una experiencia o proyecto concreto en el que introduce la tecnología blockchain en España diría que existe un impacto en la relación entre los socios de la cadena de suministro agroalimentario durante y después de la implementación?

18. ¿Qué otros agentes me recomendarían que contactara al objeto de conocer mayores detalles de la utilidad del blockchain en las cadenas de suministro agroalimentario en España?

Anexo D

Otras Tablas

Tabla D 1: Soluciones comerciales.

Plataforma	URL	Objetivo Principal	Integración de requisitos de producción asociados a la trazabilidad
Trazable	https://trazable.io/software-trazabilidad-alimentaria/	Promoción de la automatización de la cadena de producción	No
Iberchain	https://iberchain.es/	Trazabilidad desde el origen del producto	Sí
Zertifier	https://www.zertifier.com/#	Trazabilidad desde el origen del producto	No verificado en el estudio
Blocktac	https://www.blocktac.com/otros-sectores/	Autenticidad	No
Vestigia	https://www.programaminerva.es/vestigia/	Trazabilidad desde el origen del producto	Sí
Asseco	https://es.asseco.com/divisiones/manufacturing/blockchain/	Promoción de la automatización de la cadena de producción	No
Foodxain (Foodchain global)	https://foodxain.com/	Trazabilidad desde el origen del producto	No
Gouze	https://gouze.io/es/industria-conectada/	Trazabilidad desde el origen del producto	No
IBM Food Trust	https://www.ibm.com/es-es/blockchain/solutions/food-trust	Trazabilidad, transparencia en la cadena de suministro, mejora de la seguridad alimentaria	información previa al centro de distribución se introduce manualmente en algunos casos.
AgriDigital	https://knowledgebase.agridigital.io/en/articles/7923267-what-is-agridigital	Gestión de la cadena de suministro, pagos seguros, contratos inteligentes	No está vinculada a parámetros agroecológicos de producción agrícola.
TE-FOOD	https://www.te-food.com/	Trazabilidad de productos alimentarios desde la granja hasta el consumidor, prevención de fraudes,	No está vinculada a parámetros agroecológicos de producción agrícola.

		mejora de la calidad de los alimentos	
Provenance	https://www.provenance.org/	Autenticidad del producto, transparencia, empoderamiento del consumidor	Sí
Bext360	https://www.bext360.com/	Trazabilidad de la cadena de suministro de productos como el café, comercio justo, transparencia	No está vinculada a parámetros agroecológicos de producción agrícola.
OriginTrail	https://origintrail.io/	Integración y verificación de datos a lo largo de la cadena de suministro, trazabilidad, autenticidad	No verificado en el estudio
FoodLogiQ	https://www.foodlogiq.com/	Trazabilidad de alimentos, gestión de retiradas de productos, cumplimiento normativo	Sí pero la información previa al centro de distribución se introduce manualmente en algunos casos
Ripe.io	https://ripe.io/	Transparencia en la calidad de los alimentos, trazabilidad	Sí
Walmart Blockchain	https://corporate.walmart.com/newsroom/2019/06/13/walmart-leads-on-food-safety-with-blockchain	Trazabilidad, reducción del tiempo de respuesta en caso de retirada de productos	la información previa al centro de distribución se introduce manualmente en algunos casos
Farm to Plate	https://www.farmtoplate.io/	Conexión directa entre productores y consumidores, trazabilidad completa de alimentos	No está vinculada a parámetros agroecológicos de producción agrícola.

Tabla D2: Empresas proveedoras de software para la trazabilidad de productos pesqueros utilizando tecnología blockchain.

Compañía	Vocación	País
Pacific FishTrax	traceable canned tuna	USA
Golfo Salvaje	traceable canned tuna	Mexico
John West Australia	traceable canned tuna	Australia
Peces legítimos	" smart digital identity (Mowi)	USA
OpenSC	low carbon food	Australia
fishworldtrack	origin of the seafood fish	SPAIN

Tabla D3: Grupos de “stakeholders” de blockchain en España según la base de datos: "Registro de Transparencia de la UE"

ORGANIZATION	ACTIVITY	INDUSTRY	REFERENCE	Blockchain application example
FOODRATION4ALL S.L.	Food NGO	FOOD BANKS	https://foodration4all.com/	Purse card to obtain food/reduce food waste
MEDIAPRO GROUP	Technical services supplier to the audio-visual sector.	AUDIO-VISUAL	AUDIO-VISUAL MEDIAPRO leader of the European Audio-visual	Market Copyright
STARUP VILLAGE	Support for entrepreneurship for the development of rural areas	RURAL DEVELOPMENT	http://startupvillage.eu/	Support for tourism activities, rural geolocation
UNESPA	Insurance	INSURERS	http://www.unespa.es	Smart contract applied to the management of insurance procedures.
FUNDACIÓN CTIC CENTRO TECHNOLOGICAL CENTRE (CTIC)	Research and development of technological solutions in various fields	MULTIPLE PROJECTS IN MANY AREAS OF ACTIVITY (Several projects based on TELOS are identified)	Telos blockchain	Several, among others: a query application for the final consumer of the product, who wants to know more information about its origin and other characteristics
HEALTH IDENTIFICATION CARD	Technological applications health sector	IT APPLIED TO THE HEALTH FIELD	http://www.fundacionctic.org	Health Code
AEI CYBERSECURITY	Business group computer security services	CYBERSECURITY	https://www.aeiberseguridad.es/	"Cybersecurity Seal", a collaborative project of a group of partners to provide a robust cybersecurity certification
COLEGIO DE REGISTRADORES DE ESPAÑA (CORPME)	FE PUBLICA REGISTRAL	PUBLIC REGISTRY	Registradores de España	Notarization of documents and authenticity.

Tabla D.4. Mapa de Agentes

Fuente*	Sector	Compañía o Agente independiente*
Blockchain in distribution industry		
TGA	Enablers/drivers. Large retailers	FM (interviewed)
JG	Large retailers	Carrefour
TGA	Large retailers	Mercadona
TGA	Enablers/drivers. Large retailers	JJ (interviewed)
Magazine	Large retailers	LIDL
Blockchain in the primary agricultural and fishing sector		
TGA	Aceite de oliva producers	Oleoestepa
TGA	Fruit and Vegetable Sector	Unica (NA)
TGA	Aceite de oliva producers	Coexpal
JA	Fruit and Vegetable Sector	
TGA	Fruit and Vegetable Sector	Federación empresarial de agroalimentación de la Comunidad Valenciana
Magazine	Cárnico sector	Covap (proyecto iberchain)
Magazine	Fruit and Vegetable Sector	Cooperativa frutas y hortalizas Huelva
JE	Aceite de oliva producers	Almazara de la Subbética (interviewed)
JG	Pesca	Puerto de Celeiro (interviewed) EML
JE	Aceite de oliva producers	Galpagro (MAM)
TGA	Citrus	Inmaculada Sanfeliu
Magazine	Cárnico sector	COREN

JG	Pesca	Nueva Pescanova
JE	Aceite de oliva producers	Rurápolis
Consulting digital services agri-food sector (Blockchain)		
Source	Company	Agent*
TGA	Thoffod	OGA (interviewed)
TGA	Ecoagra	
LinkedIn	DM	IBM (interviewed)
LinkedIn	Fish World Track (pesca)	JIA (interviewed)
JE	Rurápolis	MAM (interviewed)
MLM	Hispattec	
MLM	Certificadora Comité Andaluz de Agricultura Ecológica	
JE	Wealize digital	MAC (interviewed)
JE	Overtrace	MAM (interviewed)
LinkedIn	IBM	GSC
LinkedIn	IBM Blockchain Transparent Supply,	DM
JE	IBM	LC (interviewed)
DA	KUNFUD®	IA (interviewed)
JE	Galpagro	JMC (interviewed)
UNIVERSITIES/RESEARCH CENTERS		
Source	University	Agent*
JE	Universidad de Córdoba	JDB (interviewed)
LinkedIn	Universidad Politécnica de Sevilla	MLM (interviewed)
LinkedIn	Universidad Politécnica de Madrid	AM (interviewed)
Agenda	Universidad Politécnica de Madrid	
JE	Universidad de Granada	FLB (interviewed)
JE	Universidad de Córdoba	JE (interviewed)
JE	Universidad de Granada	FLB (interviewed)
JE	Universidad de Córdoba	JE (interviewed)
MITECO	CSIC	DE (interviewed)
WEB	CTIC (Asturias)	
WEB	Universidad de Salamanca	

PUBLIC SECTOR (national level)		
Agenda	MITECO (Ministry of Industry)	PGP (interviewed)
Agenda	MAPA (Ministry of Agriculture)	CG (interviewed)

*For reasons of data protection, only the initials of the reference expert are used.

Tabla D.5. Proyectos internacionales que se han utilizado como referencia relevante en los exámenes de arquitectura de sistemas

PROJECT	REFERENCE	OPERATION / CHECKPOINTS	DEVELOPER
Fish Best 360	https://360seafood.com/en/https://images.axfoundation.se/uploads/2018/09/Final-Report_Axfoundation_Designing-Blockchain-Use-Cases-to-Deliver-Greater-Sustainability-in-the-Food-Chain_2019-04-25.pdf	printed traceability code which embeds the relevant data that allows the tracking of a product to its underlying and the relevant data sets about its origin (primary data of pesca and farms).	IBM
Turkey Cargill's Blockchain	https://thecounter.org/cargill-blockchain-traceable-turkey-contract-farming-reality-thanksgiving/	8 checkpoints. plot, mill, facilities and distribution	IBM
Aceite de oliva Extra virgen "terra Delyssa"	https://newsroom.ibm.com/2020-01-14-CHO-Taps-IBM-Food-Trust-to-Provide-Insight-on-Quality-and-Origin-of-Terra-Delyssa-Extra-Virgin-Olive-Oil	information on the place of origin and fed, treatments, place of slaughter and distribution.	IBM
Carrefour quality line de auvenia	https://gccviews.com/carrefour-se-moderniza-y-pone-a-sus-pollos-en-blockchain/	combined with radio frequency capture zone	IBM
Sea Quest Fiji Ltd & WWF	https://www.wwf.org.nz/what_we_do/marine/blockchain_tuna_project/	cultivation places, dates, quality control of potatoes (ingredients of potato puree)	ConsenSys
Carrefour and Mousline Nestlé	https://www.ift.org/news-and-publications/news/2019/april/16/nestle-and-carrefour-test-blockchain-platform-with-mousline-puree?fullsite=true	origin and place of transformation	IBM
Sales platform	https://dashboard.karyonfood.com/		

Tabla D.6: Proyectos en curso o completados que utilizan tecnología blockchain para garantizar ciertas condiciones de producción a lo largo de la cadena de suministro.

(Proyectos identificados a través de la bibliografía y referencias citadas por los agentes)

COMPAÑÍA	PROYECTO	SECTOR	UTILIDAD	GRADO DE IMPLEMENTACIÓN	VERIFICADO	DESARROLLADOR	WEB
Nutrasing	(various) raspberry traceability	hortofrutícola	Proceso regulatorio digital seguro	piloto	no	FOOD TRACK	nutrasign
Fish world track	fish world track	pesca	Rastrear el pescado desde el mar hasta la mesa	en producción	si	META	https://fishworldtrack.com/
Cofradía Puerto de Celeiro	“Merluza de pincho” Hake	pesca	Origen, condiciones de pesca y trazabilidad del lote después de la subasta	implementado pero abandonado después del final de la financiación.	si	Food Trust (IBM)	carrefour lanza el primer blockchain de pescado fresco - detalle nota de prensa - carrefour españa
Navidul	Navidul pork	cárnico	Gestión de almacenamiento y registro	piloto	no	Food Trust (IBM)	https://www.interempresas.net/industria-carnica/articulos/313905-navidul-pionera-en-la-implantacion-de-blockchain-en-jamon-iberico.html
ITCL technologic centre	Agraria	hortofrutícola	Aplicar inteligencia artificial a toda la cadena de valor	conceptualización	si	Alastria	https://itcl.es/en/itcl-about-us/

Covap	iberchain	cárnico	Certificar el cárnico ibérico para mejorar la trazabilidad del cerdo 100% ibérico	piloto	no	Alastria	https://static.covap.es/notas-prensa/2021/np-el-iberico-100-entra-en-el-blockchain.pdf
Oleoestepa	Oil quality	aceite de oliva	Origen, parcelas de producción, tiempo de entrega y lotes.	piloto	si	Alastria	https://www.oleoestepa.com/aceite-de-calidad/produccion-sostenible/
Inmaculada san feliu	Traceability of citrus	hortofrutícola	Origen.	Sin información (comienzo en 2019)	no		
Unica	Traceability of citrus	hortofrutícola	Trazabilidad para exportación	sin información (comienzo en 2019)	no	Sistema informático de trazabilidad cítrica (SITC)	https://www.agritotal.com/nota/40637-citricos-el-sitc-ahora-incorpora-la-tecnologia-blockchain/
CTIC	dopchain	DPO	Autenticidad	en proyecto	no	solution dopchain (based in Ethereum) Alastria	https://www.fundacionctic.org/es/proyectos/dopchain-solucion-basada-en-tecnologias-blockchain-para-la-trazabilidad-de-productos-de
Universidad de Córdoba and Fedacova.	Carne de ternera	cárnico	Certificar las condiciones de producción desde la granja hasta la mesa	en proyecto	no	IBM	https://www.iof2020.eu/trials/cárnico/iot-and-blockchain-for-beef-supply-chain
Fundación Patrimonio Olivarero	SAR	aceite de oliva	Aceite de oliva: trazabilidad del aceite de oliva, autocontrol	sin información (comienzo en 2019)	no		https://www.patrimonioliv arero.com/

			(SAR), control de almacenes.				
Grupo operativo SOSTVAN-	Certified cows' cárnico	cárnico	Estrategias tecnológicas para mejorar la sostenibilidad de la vaca nodriza	en proyecto Universidad de León	no	universidad de león. hyperledger. linux	https://www.sostvan.com/
Iberchain (pdo)	Iberico	cárnico	Raza autóctona ibérica: cerdo ibérico. Evitar fraudes	<u>el sistema basa los criterios de calidad en análisis NIRS aplicados a la discriminación racial. (inicio del proyecto 2019) no Alastria</u> https://iberchain.es/	no	Alastria	https://iberchain.es/
Lechazo clm (PDO)	control of traceability from birth to slaughterhouse as an anti-fraud mechanism for documentary	cárnico	Evitar fraudes. Control de trazabilidad desde el nacimiento hasta el matadero como mecanismo anti-fraude para el cordero lechal documental CLM	en proyecto (comienza a funcionar en junio de 2022)	si	SMES led by kunfud on alastria's t-net (quorum-base) and EBSI (european blockchain services infrastructure)	https://www.kunfud.com/

Vinassure	Eprovenance wine	vitivinícola	Rastrear los vinos desde el viñedo hasta el consumidor final.	en proyecto (comienza a funcionar en junio de 2022)	no	IBM blockchain.	https://www.eprovenance.com/home/services/vinassure/
Vestigia	porcinova pilot	Cárnico	Control de trazabilidad y mecanismo anti-fraude documental	piloto	No	Alastria	https://porcinnova.es/financiacion-pilot/

Tabla D.7

Fuentes de datos de utilizadas en la plataforma Madrid Rural.

PUNTO CADENA DE SUMINISTRO	TIPOLOGÍA DATO 1	TIPOLOGÍA DATO 2	TIPOLOGÍA DATO 3	VARIABLE	ORIGEN DE DATOS				
PRODUCCION	INFORMACIÓN GENERAL	DATOS GENERALES DE LA EXPLOTACIÓN	DATOS DE LA EXPLOTACION	Nº de Orden de parcelas	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Nombre ó Razón Social	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				NIF	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				REA	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				SIEX	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Dirección	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Localidad	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Código Postal	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Provincia	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				Teléfono	CUE (Cuaderno de campo digital)				
			email	CUE (Cuaderno de campo digital)					
			TITULAR O REPRESENTANTE DE LA EXPLOTACIÓN	Nombre ó Razón Social	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				NIF	CUE (Cuaderno de campo digital)				
				REFERENCIAS SIGPAC	Código Provincia	CUE (Cuaderno de campo digital)			
					Término municipal	CUE (Cuaderno de campo digital)			
	Código agrgado	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Zona	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Polígono	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Parcela	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Recinto	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Uso Sigpac	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Superficie SIGPAC (ha)	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	Superficie cultivada (ha)	CUE (Cuaderno de campo digital)							
	DATOS AGRONÓMICOS	Especie	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Variedad	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Secano/Regadio	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Aire libre o protegido	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Sistema de asesoramiento	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Gestión Integrada Plagas	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Fecha	CUE (Cuaderno de campo digital)						
Producto		CUE (Cuaderno de campo digital)							
Cantidad de producto (kg)		CUE (Cuaderno de campo digital)							
Nº de orden parcela/s de		CUE (Cuaderno de campo digital)							
REGISTRO DE COSECHA COMERCIALIZADA	AGRICULTOR	Nº de albarán o factura	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Nº de lote	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Nombre o razón social	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		NIF	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Dirección	CUE (Cuaderno de campo digital)						
	CLIENTE	Nº de RGSEAA	CUE (Cuaderno de campo digital)						
		Fecha de recepción en	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL						
		Fecha de entrega por parte de Madrid Rural	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL						
		Precios de venta a Madrid Rural por producto	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL						
		Precio de venta a de Madrid Rural a	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL						
RECEPCION-MANIPULACION-DISTRIBUCION	DATOS MADRID RURAL	Recepción, almacenaje, MANIPULACION y expedición de producto	MADRIDRURAL	CIF del distribuidor (nombre y dirección)	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL				
				CIF del comercializador (nombre y dirección)	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL				
				Identificación de remesa o lote	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL				
				Fecha de recepción a la plataforma	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL				
				Fecha de recepción en centro de trabajo	CLIENTE				
				COMERCIALIZACIÓN	SUPERMERCADOS	RECEPCION PLATAFORMA CLIENTE	SUPERMERCADO	Fecha de recepción en centro de trabajo	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL
					RESTAURACION COLECTIVA	RECEPCIÓN CLIENTE	OFINAS	Fecha de recepción en centro de trabajo	ERP TOOLAGRO MADRID RURAL

