



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD
DE INGENIERÍA

TESINA FINAL DE GRADO
Licenciatura en Ciencias de la Computación

**Desarrollo de una aplicación basada en
tecnología blockchain orientada a la
trazabilidad y valorización del vidrio**

Autora: Rocío Belén Corral
Tutor: Pablo Javier Vidal

Julio 2025

Être et Durer
Ser y durar

AGRADECIMIENTOS

Agradecer. Gracias totales.

*Rocío Belén Corral
Mendoza, Argentina
Julio 2025*

RESUMEN

La trazabilidad permite identificar el origen y las etapas de producción y distribución de bienes, facilitando la implementación de prácticas de economía circular, donde los residuos se reciclan o reutilizan en lugar de desecharse. En particular, es deseable poder realizar la trazabilidad del vidrio, dado que es un producto que puede ser reciclado o reinsertado en la cadena de suministro de diferentes formas.

Para proporcionar un nivel superior de transparencia, seguridad y eficiencia, los sistemas de trazabilidad están comenzando a hacer uso de la tecnología blockchain. Esta tecnología permite crear registros inmutables y descentralizados, asegurando la integridad de la información y evitando manipulaciones externas. Además, brinda confianza a los consumidores al garantizar la autenticidad y calidad de los productos, mientras que también permite a las organizaciones que adoptan esta tecnología diferenciarse en el mercado, al demostrar su compromiso con la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente.

En este trabajo se desarrolla un prototipo de sistema de trazabilidad del vidrio basado en tecnología blockchain, diseñado para registrar y verificar cada etapa de su ciclo de vida, desde la producción hasta su reintroducción en la cadena de valor, facilitando su valorización. Este desarrollo sigue un proceso de ingeniería de software bajo el modelo en V, el cual estructura las fases de diseño, implementación y pruebas. Se detallan las etapas de análisis de requisitos, diseño arquitectónico, implementación del prototipo y verificación exhaustiva de sus funcionalidades, con el fin de demostrar la viabilidad y los beneficios de aplicar blockchain para una economía circular de vidrio transparente y sostenible.

ABSTRACT

Traceability enables the identification of the origin and various stages of goods' production and distribution processes, facilitating the implementation of circular economy practices where waste is recycled or reused instead of discarded. In particular, it is desirable to achieve the traceability of glass, as it is a product that can be recycled or reinserted into the supply chain in different ways.

To provide a superior level of transparency, security, and efficiency, traceability systems are leveraging blockchain technology. This technology allows for the creation of immutable and decentralized records, ensuring data integrity and preventing external manipulation. Furthermore, it fosters consumer confidence by guaranteeing product authenticity and quality, while also enabling organizations that adopt this technology to differentiate themselves in the market by demonstrating their commitment to sustainability and environmental responsibility.

This work develops a prototype blockchain-based glass traceability system, designed to record and verify each stage of its lifecycle, from production to its reintroduction into the value chain, thus facilitating its valorization. This development follows a V-model software engineering process, which structures the design, implementation, and testing phases. The stages of requirements analysis, architectural design, prototype implementation, and exhaustive testing of its functionalities are detailed, with the aim of demonstrating the viability and benefits of applying blockchain for a transparent and sustainable circular glass economy.

TABLA DE CONTENIDOS

<i>Índice de Figuras</i>	xiii
<i>Índice de Tablas</i>	3
1. Introducción	5
1.1. Motivación	5
1.2. Objetivos	7
1.3. Estructura general del documento	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Blockchain	9
2.1.1. Estructura de una Blockchain	10
2.1.2. Contratos Inteligentes	17
2.1.3. Desafíos y Oportunidades	19
2.2. Economía Circular	22
2.2.1. Políticas sustentables	23
2.2.2. Cadena de suministro	25
2.2.3. Proceso de producción y reciclaje en la economía circular	28
2.2.4. Cadena de suministro del vidrio	30
2.3. Proyectos y Trabajos Relacionados	32
3. Metodología de Trabajo	37
3.1. Planificación del Plan de Trabajo	37
3.2. Metodología de Investigación	38
3.2.1. Revisión de la Literatura y Proyectos Aplicados	39
3.2.2. Investigación de Campo: Contexto Local y Global	39
3.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos	40
3.2.4. Delimitación del Alcance	40
3.3. Metodología de Desarrollo	41
3.3.1. Modelo en V	41
3.3.2. Gestión del Proceso	43
4. Modelado de Requerimientos	45
5. Diseño de Solución	47

6. Implementación	49
7. Pruebas	51
8. Conclusiones	53
8.1. Resultados	53
8.2. Desafíos	53
8.3. Perspectivas Futuras	54
Apéndices	
A. Contenido Anexo	61
A.1. Multimedia	61
A.2. Código fuente	61
A.3. Documentación técnica	61
B. Tecnologías Blockchain	63
B.1. Hyperledger Fabric	64
B.2. Ethereum	64
B.3. Polkadot	65
B.4. VeChain	66
B.5. Cardano	66
B.6. Comparación	67
B.7. Conclusión	67
C. Materiales Reciclables	69
C.0.1. Residuos Orgánicos	69
C.0.2. Residuos Electrónicos	69
C.0.3. Papel y Cartón	69
C.0.4. Plásticos	70
C.0.5. Textiles	70
C.0.6. Metales	70
C.0.7. Vidrio	71
C.0.8. Residuos de Construcción y Demolición	71
C.0.9. Decisión Final	71
C.1. Comparación entre Vidrio y Plástico	71
D. Entrevista a Verallia	73
E. Viaje de Investigación	75
F. Metodologías de Desarrollo de Software	77
F.1. Metodologías de desarrollo de software	78
F.1.1. Modelo en cascada	79
F.1.2. Modelo en V	79

F.1.3. Modelo espiral	80
F.1.4. Metodología Scrum	82
F.1.5. Metodología Kanban	83
F.2. Comparación de metodologías	84
F.3. Ágil (Scrum)	84
F.4. Ágil (Kanban)	85
F.5. Cascada	85
F.6. Modelo en V	86
F.7. Espiral	86
F.8. Selección de metodología	87
F.8.1. Implementación Conjunta de Metodologías	89
G. User Flow	91
H. Resultados de Pruebas Automatizadas	93
I. User Acceptance Testing	95
<i>Bibliografía</i>	97
<i>Glosario</i>	99
<i>Siglas</i>	99

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Comparación entre el modelo cliente-servidor y el modelo P2P	11
2.2. Intersección de tecnologías y conceptos que componen la tecnología blockchain	11
2.3. Estructura básica de una cadena de bloques	12
2.4. Contenido de un bloque en una cadena de bloques	12
2.5. Ejemplo de códigos hash generados a partir de cadenas de texto	13
2.6. Creación de una transacción y un bloque en una blockchain	16
2.7. Proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente	18
2.8. Comparación entre la economía lineal y la economía circular	22
2.9. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas	24
2.10. Componentes de una cadena de suministro	26
2.11. Ciclo productivo de la economía circular	28
2.12. Usos de la tecnología blockchain en las etapas de la economía circular [7]	29
2.13. Ciclo de vida de envases de vidrio en un modelo de economía circular	30
3.1. Planificación de las actividades del plan de trabajo	38
3.2. Modelo de Desarrollo en V [31]	42
C.1. Composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina. Fuente: CEPAL, 2021.	70
F.1. Modelo en cascada. Fuente: [31]	79
F.2. Modelo en V. Fuente: [31]	80

F.3. Modelo espiral. Fuente: [31]	81
F.4. Metodología Scrum. Fuente: [31]	82
F.5. Tablero Kanban de ejemplo.	83

ÍNDICE DE TABLAS

B.1. Comparación de plataformas blockchain	67
C.1. Comparación entre vidrio y plástico en el contexto de economía circular.	72

1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El mundo se enfrenta a un desafío ambiental sin precedentes: la gestión insostenible de los recursos naturales. La producción y consumo masivos de bienes generan un volumen creciente de residuos, lo que pone en riesgo la salud del planeta y el bienestar de las generaciones futuras [1, 2]. En este contexto, la transición hacia una economía circular se presenta como una solución prometedora para mitigar este impacto y construir un futuro más sostenible [3]. Este modelo económico busca maximizar el valor de los recursos a lo largo de su ciclo de vida, minimizando el desperdicio y reintroduciendo los materiales en los sistemas de producción [4, 5]. Sin embargo, el principal desafío para lograr una economía circular radica en la falta de transparencia y trazabilidad dentro de las cadenas de suministro tradicionales.

Esta falta de visibilidad dificulta la capacidad para identificar oportunidades de reutilización y reciclaje, responsabilizar a las industrias por su impacto ambiental y empoderar a los consumidores para que tomen decisiones informadas.

Investigaciones previas han explorado diversas tecnologías para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, incluidos códigos de barras, etiquetas RFID y redes de sensores [6]. Estas tecnologías ofrecen cierto nivel de capacidad de seguimiento; sin embargo, a menudo están limitadas por factores como la falta de estandarización, la fragmentación de información y la vulnerabilidad a la manipulación [6].

En los últimos años, la tecnología blockchain ha surgido como una solución prometedora para abordar estas limitaciones [7-9]. Sus características principales, como el registro de datos distribuido, la inmutabilidad y la transparencia, la convierten en una plataforma ideal para registrar y rastrear el movimiento de mercancías a lo largo de la cadena de suministro [7]. Múltiples es-

tudios han explorado diversas aplicaciones de la tecnología blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, demostrando su potencial para mejorar la transparencia y la responsabilidad dentro de estos sistemas. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen la creación de un registro inmutable del origen de los productos para verificar su autenticidad y combatir la falsificación [8], el rastreo de materiales a lo largo de la cadena de suministro para apoyar una economía circular [7], la optimización de la logística y la gestión de inventario mediante información en tiempo real [10], y la promoción de prácticas sostenibles al identificar productos con menor impacto ambiental [8].

La investigación existente reconoce el potencial de blockchain para la trazabilidad de la cadena de suministro, pero muchas soluciones propuestas se enfocan únicamente en la tecnología blockchain [7-9], lo que limita su aplicabilidad en contextos donde se requiere la integración con sistemas de gestión tradicionales y tecnologías complementarias. Además, la mayoría de los estudios se centran en casos de uso específicos, como la industria alimentaria o farmacéutica, dejando una brecha significativa en la aplicación de blockchain para mejorar la trazabilidad en otros sectores, como el reciclaje de vidrio.

En Latinoamérica, el vidrio representa el 5 % de los residuos sólidos urbanos [11], y solo el 20 % de este vidrio se recicla [12]. La baja tasa de reciclaje de vidrio en la región se debe a la falta de infraestructura y sistemas de gestión adecuados, así como a la falta de conciencia y educación sobre la importancia del reciclaje. Mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio facilita su reciclaje, ayudando a promover una economía circular sostenible en la región. Al visibilizar el flujo de materiales y promover prácticas de reciclaje, y facilitar la información y procesos a los usuarios, es posible reducir la generación de residuos, disminuir la extracción de materias primas vírgenes y fomentar la reutilización de materiales en la producción de nuevos envases de vidrio.

Teniendo en consideración que la actividad económica principal de la provincia de Mendoza es la producción de vino, esta es una problemática local y concreta cuya solución puede tener un impacto real en la economía local. La industria del vidrio es un actor relevante en la cadena de suministro de vino al proveer los envases para el embotellado de los vinos. Por lo tanto, mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio puede tener un impacto significativo en la sostenibilidad de la industria vitivinícola y en la economía regional.

A su vez, este trabajo se enfoca específicamente . Esta decisión se fundamenta en la importancia del vidrio como material reciclable y la necesidad de mejorar su gestión dentro de la economía circular.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una solución de trazabilidad basada en tecnología blockchain para la cadena de suministro y reciclaje de envases de vidrio con el fin de mejorar la transparencia y la sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo. La solución propuesta busca abordar las limitaciones de las tecnologías existentes y proporcionar una plataforma que permita a los actores involucrados en la cadena de suministro del vidrio rastrear y verificar el origen, el movimiento y el estado de los envases a lo largo de su ciclo de vida.

Este trabajo propone un enfoque abierto que permite integrar blockchain con Internet de las cosas (IoT) y sistemas de gestión tradicionales. Esta integración permite aprovechar los datos en tiempo real de los sensores de IoT, proporcionando una visión más completa y confiable del movimiento y el estado del producto a lo largo de la cadena de suministros. Además, esta solución es compatible con sistemas de gestión tradicionales, facilitando la adopción dentro de las prácticas comerciales existentes. Se espera que este enfoque combinado represente una implementación factible y práctica para mejorar la trazabilidad de la cadena de suministro, en última instancia, contribuyendo a la transición hacia una economía circular sostenible.

Al abordar este caso de estudio específico, se busca proporcionar una solución concreta y aplicable en el ecosistema mendocino que a su vez pueda servir en un futuro como modelo para adaptarse a otras industrias y a una variedad amplia de materiales reciclables.

1.2. Objetivos

El objetivo general de esta Tesina Final de Grado consiste en hacer uso de blockchain como tecnología de vanguardia para el desarrollo de una aplicación prototipo destinada a mejorar la trazabilidad en modelos de economía circular orientados al reciclaje de vidrio.

- **Objetivo 1:** entender los procesos de adopción de tecnologías tales como blockchain y las capacidades actuales en la región para el uso de sistemas de trazabilidad.
- **Objetivo 2:** en lo referido a las Ciencias de la Computación, se busca desarrollar una aplicación prototipo funcional basada en tecnología blockchain. Esto permitirá la trazabilidad transparente, segura y en tiempo real de la gestión de residuos, en particular el vidrio, desde su generación hasta su disposición final, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la confianza entre todos los actores involucrados en el proceso.

1.3. Estructura general del documento

El presente documento se encuentra organizado en capítulos, cada uno de los cuales aborda un aspecto del trabajo realizado. En primer lugar, en el Marco Teórico, se introducen los conceptos básicos relacionados con el problema y la tecnología utilizada, para desenlazar en un análisis de las soluciones existentes y los antecedentes académicos relevantes para contextualizar el trabajo. En el siguiente capítulo, se detalla la metodología adoptada y la planeación del trabajo. En capítulos posteriores se describe el proceso de diseño, desarrollo y pruebas de la solución propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas y las perspectivas futuras del proyecto. Adicionalmente, al final del documento se incluyen anexos como lectura opcional y un glosario de términos específicos que pueden resultar útiles para el lector.

2

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta los fundamentos teóricos que sirven de base para este trabajo. Se aborda la estructura y funcionamiento de las cadenas de bloques, destacando sus características de descentralización, transparencia e inmutabilidad, así como los mecanismos de consenso que garantizan su seguridad y eficiencia. Además, se analiza el rol de los contratos inteligentes como herramientas para automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio en entornos descentralizados. Asimismo, este capítulo explora los principios de la economía circular, enfatizando su enfoque regenerativo y su capacidad para transformar las cadenas de suministro hacia modelos más sostenibles. Se examinan las etapas del proceso de producción y reciclaje, con especial atención a la trazabilidad como habilitador para garantizar la transparencia y la eficiencia en una economía circular. Luego se incluye un análisis de la cadena de suministro del vidrio en el contexto mendocino, destacando su relevancia estratégica y los desafíos asociados a su implementación en un modelo circular. Finalmente, se explora el estado del arte de la tecnología *blockchain* en la economía circular, identificando las tendencias actuales y las oportunidades de mejora en la trazabilidad y sostenibilidad de la cadena de suministro del vidrio.

2.1. Blockchain

La tecnología *blockchain*, o cadena de bloques, sirve para registrar información digital de manera segura, transparente e inmutable. Es relevante comprender los motivos de su surgimiento como una tecnología disruptiva en los últimos años, antes de introducir su estructura y funcionamiento.

Para entender la necesidad e impacto de la tecnología blockchain, primero es necesario analizar la arquitectura predominante de Internet hasta la actualidad, basada tradicionalmente en un

modelo centralizado cliente-servidor. En este esquema, los datos son almacenados en servidores administrados por proveedores, quienes actúan como intermediarios de confianza entre los clientes o usuarios. Aunque este modelo ha facilitado el intercambio de información a escala masiva, también ha generado problemas de confianza, seguridad y privacidad. La centralización implica que los usuarios ceden el control y gestión de sus datos a terceros, lo que puede derivar en una dependencia significativa de estas entidades para la integridad y disponibilidad de la información. Ejemplos de esto incluyen la exposición de datos personales privados en ciber-ataques, la interrupción de servicios por fallas en servidores centrales o la censura de contenido por decisiones unilaterales de las plataformas [13]. Por ejemplo, cuando el servidor de Whatsapp deja de funcionar, los usuarios no pueden utilizar la aplicación para comunicarse hasta que el proveedor vuelva a hacerlo funcionar. Otro ejemplo, es cuando un proveedor sufre un ciber-ataque y se filtran contraseñas de los usuarios, quienes no tienen conocimiento de las vulnerabilidades que puede tener el proveedor, pero dependen de su servicio.

Ante los desafíos de confianza e integridad en los sistemas centralizados, la tecnología blockchain surgió en 2008 como una solución disruptiva. Su primera aplicación fue como base del sistema de criptomonedas Bitcoin [14], pero rápidamente demostró potencial más allá del ámbito financiero. En la actualidad, blockchain se considera una herramienta útil para resolver problemas de confianza, transparencia e inmutabilidad en la gestión de datos. Su diseño permite registrar información de manera distribuida, sin necesidad de proveedores centralizados, habilitando la interacción directa entre múltiples partes [8].

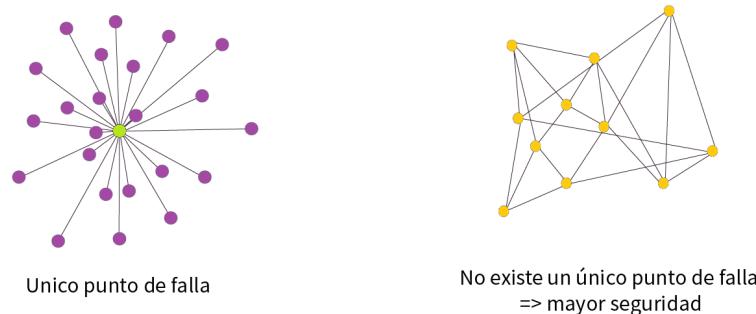
Es importante destacar que blockchain no introduce tecnologías completamente nuevas, sino que integra de forma innovadora principios existentes de la computación y las matemáticas. Combina conceptos de criptografía (para asegurar la información), redes distribuidas (para la replicación de los datos) y teoría de juegos e incentivos (para coordinar el comportamiento de los participantes y garantizar la seguridad de los datos) [8, 15]. Esta integración produce un sistema seguro, transparente y resistente a manipulaciones, características difíciles de lograr en modelos centralizados. De esta manera, blockchain impulsa un nuevo paradigma donde el registro de la información es gestionado colectivamente, lo que permite transacciones y acuerdos entre pares sin depender de un tercero de confianza centralizado.

En las próximas páginas se explorará en detalle la estructura y funcionamiento de la tecnología blockchain, sus características distintivas, los mecanismos de consenso que garantizan su seguridad y el papel de los contratos inteligentes como herramientas para la automatización de procesos. Además, se analizarán las ventajas y desafíos asociados a su implementación, así como su potencial de uso más allá del ámbito financiero.

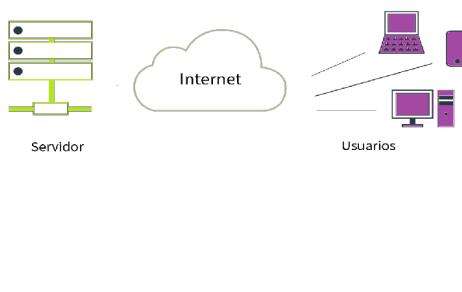
2.1.1. Estructura de una Blockchain

La tecnología *blockchain*, o cadena de bloques, es una estructura de datos distribuida y descentralizada donde la información se organiza en transacciones agrupadas en bloques enlazados criptográficamente. Cada bloque posee un código único, conocido como *hash del bloque*, que lo

Centralizado vs. Distribuido



La Arquitectura Cliente-Servidor



Blockchain

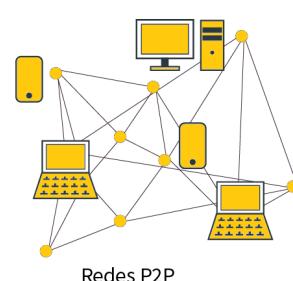


Figura 2.1: Comparación entre el modelo cliente-servidor y el modelo P2P

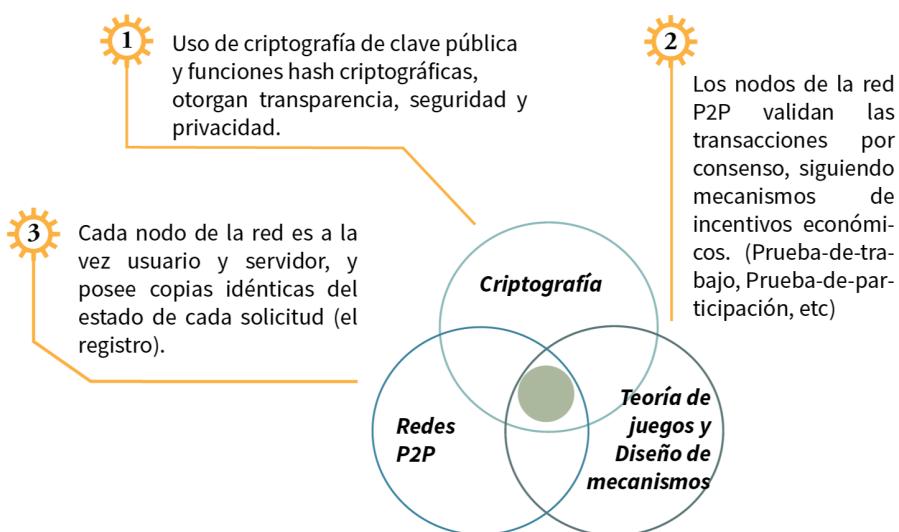


Figura 2.2: Intersección de tecnologías y conceptos que componen la tecnología blockchain

identifica y sirve para enlazarlo al bloque posterior. El hash de cada bloque se genera a partir de su contenido y del hash del bloque anterior, creando así una cadena continua de bloques interconectados [16]. En la Figura 2.3 se ilustra la estructura simplificada de una blockchain, donde cada bloque incluye el hash del bloque anterior, formando una cadena de bloques interconectados.

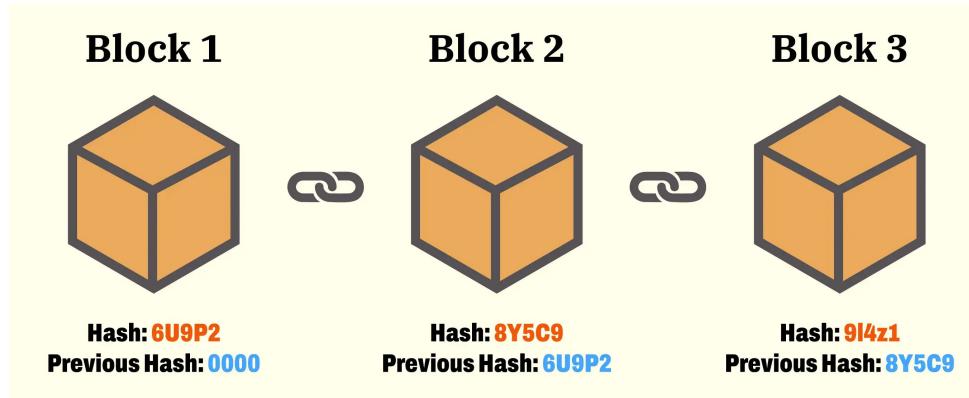


Figura 2.3: Estructura básica de una cadena de bloques

Cada bloque de la cadena consta de un encabezado y un cuerpo [16]. El cuerpo guarda la lista de transacciones, mientras que el encabezado contiene metadatos (que pueden variar en cada implementación). Entre los metadatos más relevantes se encuentran el código único del bloque anterior, una marca de tiempo, y el código que identifica únicamente al bloque actual. En la Figura 2.4 se puede observar un esquema del contenido de un bloque de la cadena.

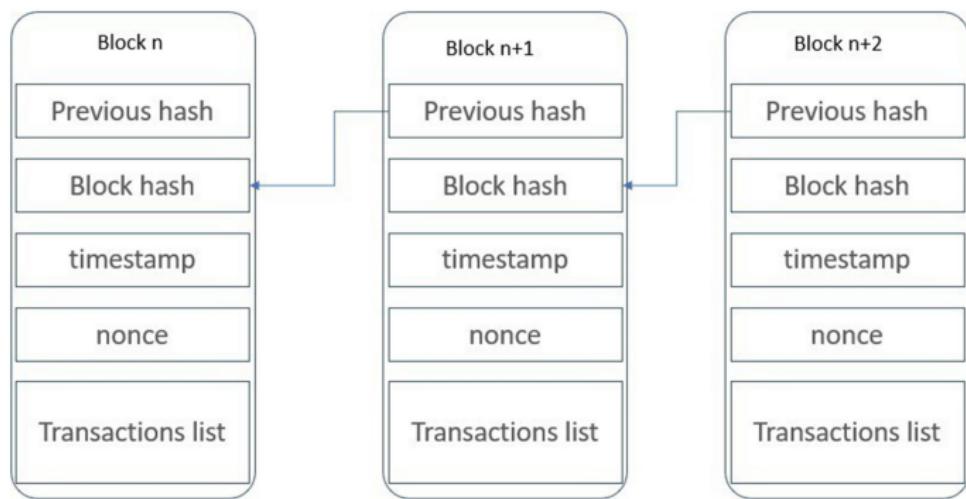


Figura 2.4: Contenido de un bloque en una cadena de bloques

El hash del bloque se calcula usando funciones hash criptográficas, que son algoritmos matemáticos que transforman datos de entrada en una cadena de caracteres de longitud fija. Los códigos hash tienen la propiedad de ser rápidos de calcular, difíciles de revertir (matemáticamente imposible hacerles ingeniería inversa) y únicos para cada conjunto de datos (cualquier cambio en el contenido del bloque generará un código hash completamente diferente) [13]. Estas características permiten verificar la integridad de los datos almacenados en la cadena, ya

que el código hash de un bloque se puede recalcular en cualquier momento y comparar con el código almacenado en la cadena. Si los códigos coinciden, se puede confiar en que los datos no han sido alterados; si no coinciden, se ha producido una modificación no autorizada en el contenido del bloque [13]. En la Figura 2.5 se puede ver un ejemplo de los códigos generados usando un algoritmo hash a partir de dos cadenas parecidas, donde se observa que incluso un cambio mínimo en el contenido produce un hash completamente diferente.

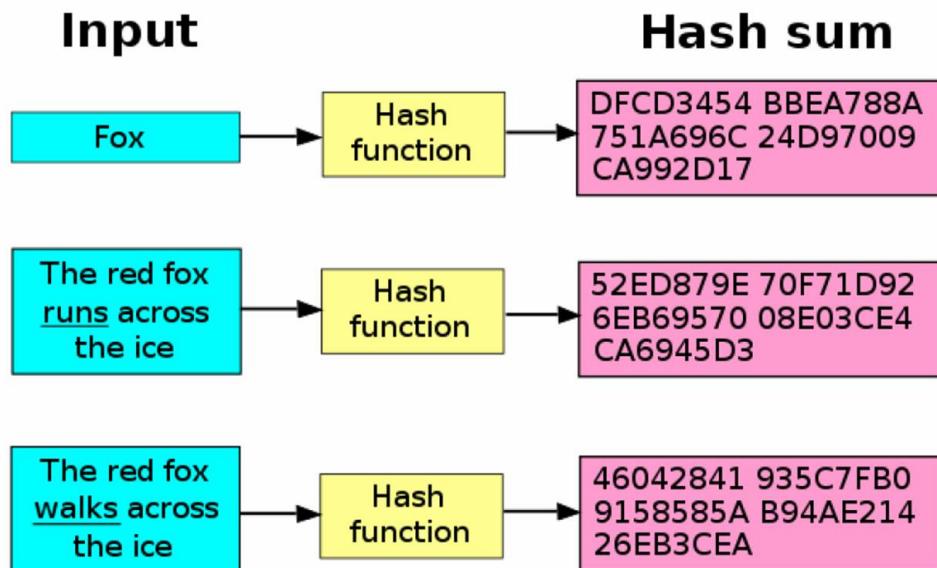


Figura 2.5: Ejemplo de códigos hash generados a partir de cadenas de texto

La interconexión criptográfica entre los bloques confiere a blockchain su característica de inmutabilidad. Una vez que un bloque es añadido a la cadena, su hash se calcula a partir de su contenido y el hash del bloque anterior. Cualquier intento de alterar el contenido del bloque invalidaría este hash y, por ende, los hashes de todos los bloques subsiguientes, rompiendo la integridad criptográfica de la cadena. Este mecanismo permite la detección de cualquier intento de manipulación y la preservación de la integridad histórica del registro [8].

Como ya se mencionó, la blockchain es una estructura de datos distribuida y descentralizada. Ser distribuida significa que la información no se encuentra almacenada en un único servidor, sino que está distribuida en una red de computadoras interconectadas (conocidas como nodos) y cada nodo de la red mantiene una copia completa y actualizada del registro (de toda la cadena de bloques). Esto asegura su transparencia y resiliencia al no depender de un servidor central [8] propenso a ataques maliciosos y puntos únicos de fallo. Por su parte, la descentralización implica la ausencia de una autoridad central, de modo que la validación y adición de nuevos bloques se rige por un *mecanismo de consenso* entre todos los nodos participantes de la red.

Los mecanismos de consenso son algoritmos o una serie de reglas que se definen en una red distribuida para que todos los nodos (que en este caso deben guardar exactamente la misma cadena de bloques) se pongan de acuerdo sobre qué información es correcta y válida. Sin un mecanismo de consenso, la red sería vulnerable a ataques por parte de nodos maliciosos que

esparzan información inválida por la red con fines de beneficio propio, pudiendo perjudicar al resto de la red. Por ejemplo, en la red Bitcoin, cada transacción representa una transferencia de fondos entre cuentas; un nodo podría difundir transacciones al resto de la red registrando que cientos de usuarios le transfirieron fondos a una cuenta en específico, si el mecanismo de consenso no definiera reglas para validar el origen legítimo de cada transacción, este nodo malicioso podría robar los fondos de los demás usuarios para beneficio exclusivo de la persona que controla ese nodo.

Cada nodo de la red blockchain ejecuta un mismo programa computacional (software) que codifica las reglas del mecanismo de consenso, definiendo cómo crear transacciones y bloques válidos, transmitirlos a la red y comprobar la validez de una transacción o bloque recibido de otro nodo antes de agregarlo a su copia local de la cadena (o descartarlo si no es válido).

Para unirse a la red, un nuevo nodo descarga una copia completa de la cadena de bloques existente, lo que le confiere una visión completa del historial de transacciones y el estado actual de la cadena [8]. Posteriormente, el nodo comienza a ejecutar el software del mecanismo de consenso. A partir de entonces, el nodo puede generar nuevas transacciones y transmitirlas a la red para ser recibidas por los demás nodos. Asimismo, el nodo recibe transacciones de otros nodos y las valida mediante el mecanismo de consenso antes de añadirlas a un bloque en su copia local de la cadena [8].

Al combinar el encadenamiento criptográfico de bloques con una red descentralizada y coordinarlo a través del mecanismo de consenso, la blockchain garantiza la integridad e inmutabilidad de la información, ya que cualquier alteración maliciosa en un bloque de la cadena modificaría su hash y rompería la consistencia posterior de la cadena, forzando a cada nodo de la red descentralizada a rechazar el bloque modificado o forzando a cada nodo a modificar los hashes de todos los bloques posteriores para recuperar la consistencia [15].

En la actualidad, existen múltiples y variados algoritmos de consenso que definen distintas formas de generar un bloque válido (desde un nodo) y comprobar la validez del bloque (recibido desde otro nodo). Cada mecanismo de consenso utiliza distintas técnicas de teoría de juegos e incentivos con el objetivo de incentivar a que se unan nuevos nodos a la red (obteniendo ganancias) y desincentivar que un nodo actúe de manera maliciosa buscando un beneficio individual. Esta combinación se logra mediante esquemas donde la penalización o pérdida generada por un comportamiento malicioso supere con creces las ganancias que se puedan obtener comportándose de forma maliciosa.

El mecanismo de Prueba de Trabajo (*PoW*, por sus siglas en inglés) es uno de los algoritmos de consenso más conocidos y el primero introducido en las redes blockchain por su implementación en Bitcoin [14]. En PoW, todos los nodos (conocidos como "mineros.^{en} este contexto) compiten para resolver un problema matemático complejo que requiere una gran capacidad computacional. El primer nodo que logra resolver este problema matemático valida la transacción y crea el nuevo bloque incluyendo la solución en su encabezado. El resto de nodos recibe el bloque y comprueba que el problema haya sido resuelto correctamente. El nodo que resuel-

ve el reto recibe una compensación en Bitcoin como incentivo por aportar un bloque válido a la red. La desventaja de este algoritmo de consenso es que implica un alto costo energético debido a la carga computacional requerida para resolver el problema.

Otro mecanismo ampliamente utilizado es Prueba de Participación (*PoS*, por sus siglas en inglés), a diferencia de *PoW*, no requiere de una alta capacidad computacional para la creación de bloques. En *PoS*, los nodos (conocidos como validadores).³ puestan una cantidad de las criptomonedas como garantía de su buen comportamiento. Para generar un bloque válido, el protocolo selecciona pseudo-aleatoriamente un validador para generar el siguiente bloque, con una probabilidad de selección proporcional a la cantidad de criptomonedas que ha apostado. Una vez que el validador seleccionado crea un bloque y lo transmite a la red, los demás nodos validadores de la red simplemente comprueban que el bloque cumpla con las reglas de negocio del protocolo. Si un validador actúa de manera maliciosa, puede perder parte o la totalidad de su participación (proceso conocido como "slashing"). La principal ventaja del *PoS* es su eficiencia energética significativamente mayor en comparación con *PoW*, ya que no se requiere una minería intensiva. Además, puede ofrecer mayor escalabilidad y tarifas de transacción más bajas. Ethereum es un ejemplo de protocolo blockchain que fue implementado originalmente con *PoW*, pero que se actualizó para utilizar *PoS* debido a estas ventajas. Sin embargo, una desventaja potencial es el riesgo de centralización si la mayoría de la participación se acumula en pocos nodos, lo que podría darles un control desproporcionado sobre la red.

La Prueba de Autoridad (*PoA*, por sus siglas en inglés) es otro mecanismo de consenso donde la validación de bloques se basa en la identidad y reputación de un conjunto pre-aprobado de validadores. Para generar un bloque válido, el protocolo elige una autoridad designada (del conjunto de validadores aprobados y de confianza) que tiene el derecho exclusivo de crear y firmar el nuevo bloque. Para verificar que un bloque es válido, los demás nodos de la red simplemente comprueban la firma digital del validador que lo propuso y que el bloque cumple con las reglas del protocolo. La principal ventaja del *PoA* es su alta velocidad de transacción, ya que solo un número limitado de validadores de confianza necesita llegar a un consenso. Esto lo hace ideal para redes privadas o consorcios donde la confianza entre los participantes ya existe. Sin embargo, esta misma es su mayor desventaja, ya que la seguridad y el control de la red dependen de un pequeño grupo de entidades conocidas, lo que va en contra del principio de descentralización de muchas blockchains públicas.

Cada uno de los mecanismos mencionados ofrece distintos niveles de eficiencia de procesamiento, seguridad y descentralización. Durante la validación del bloque, se verifican múltiples aspectos en común en cualquiera de estos mecanismos: la correcta correspondencia del hash del bloque anterior con el almacenado en el encabezado del nuevo bloque, la validez de las transacciones de acuerdo a la lógica de negocios propia del protocolo blockchain, y que el hash del bloque propuesto haya sido generado correctamente a partir de la totalidad de su contenido.

Todo algoritmo de consenso debe asegurar que el costo de modificar un bloque de forma fraudulenta supere significativamente el beneficio potencial derivado de dicha acción [14]. Esta

característica garantiza que la red se mantenga segura y resistente a ataques [17]. En el caso de Bitcoin, por ejemplo, el algoritmo de consenso Proof of Work (PoW) exige que los nodos realicen cálculos computacionales intensivos para generar nuevos bloques válidos. Aunque la validación de un bloque es de complejidad constante, la alteración de un bloque ya existente implicaría la necesidad de recalcular no solo dicho bloque, sino también todos los bloques subsiguientes. Esto convierte la modificación en un proceso extremadamente costoso en términos de recursos computacionales y energía, lo cual, sumado al rechazo de la red hacia cualquier cadena alterada, desincentiva eficazmente los intentos de manipulación [14].

La combinación de la red distribuida, con la estructura encadenada criptográficamente y el mecanismo de consenso, convierten a la blockchain en una base de datos que permite registrar transacciones de manera segura, transparente e immutable, prescindiendo de una autoridad central para la administración o validación de los intercambios. En la Figura 2.6 se presenta un esquema ilustrativo con los pasos del proceso de incorporación de una nueva transacción y su respectivo bloque en una blockchain.

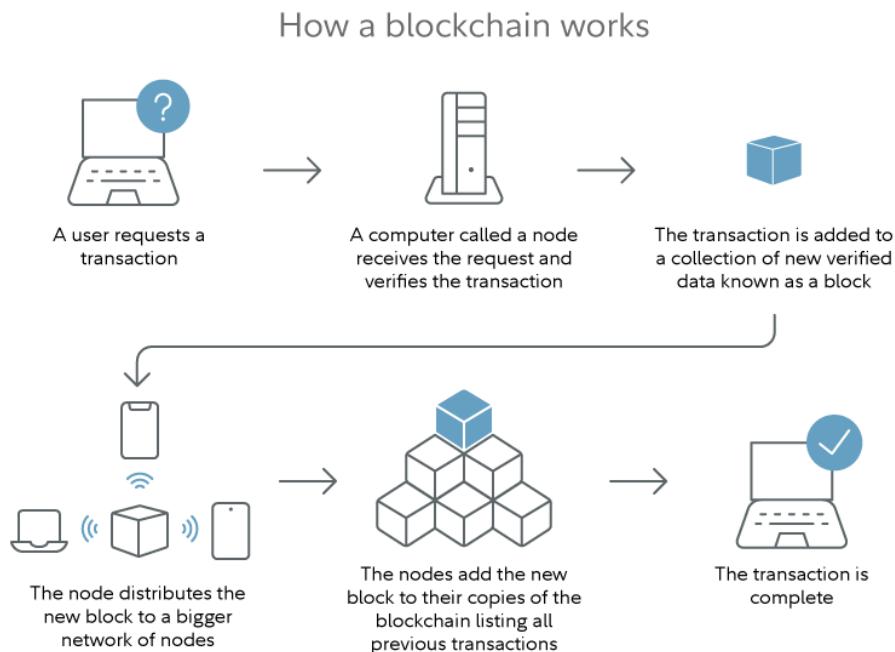


Figura 2.6: Creación de una transacción y un bloque en una blockchain

El proceso de incorporación de una nueva transacción y su respectivo bloque en una blockchain se desarrolla a través de los siguientes pasos:

1. Un nodo de la red crea y firma una nueva transacción con su clave privada (la firma criptográfica garantiza la autenticidad de la transacción)
2. La transacción se propaga a través de la red distribuida, donde es recibida por cada nodo participante.
3. Cada nodo valida la transacción individualmente, verificando la firma del remitente y asegurándose de que la transacción cumple con la lógica de negocios propia del protocolo

blockchain (por ejemplo, en Bitcoin, que el remitente cuente con los fondos a transferir). Una vez validada, la transacción se añade a un *pool* de transacciones pendientes. En caso de ser inválida, simplemente se ignora y se descarta.

4. Cuando un nodo tiene suficiente cantidad de transacciones en su *pool*, procede a seleccionar un conjunto de transacciones pendientes del *pool* para formar un nuevo bloque. Este bloque incluye las transacciones seleccionadas, el hash del bloque anterior y otros metadatos (como la marca de tiempo y un *nonce* para PoW). Luego, el nodo calcula el hash de este nuevo bloque y, según el algoritmo de consenso, realiza el trabajo necesario para garantizar que sea válido. En el caso de PoW, esto implica resolver un problema criptográfico que requiere una cantidad significativa de potencia computacional. En PoS, el nodo debe demostrar que posee una cantidad suficiente de fondos para participar en la validación del bloque.
5. Una vez que el nodo ha validado el nuevo bloque (o "minado.^{en} PoW), lo difunde a la red. Los demás nodos reciben este bloque y verifican su validez (incluyendo el hash, las transacciones y la prueba de trabajo/participación). Si el bloque es válido, cada nodo lo añade a su copia local de la cadena de bloques y descarta de su *pool* de pendientes las transacciones incluidas en el bloque. Si el bloque es inválido, es rechazado por cada nodo y no se añade a la cadena.

De esta manera, la cadena de bloques se actualiza de forma continua y descentralizada, asegurando que todos los nodos de la red mantengan una copia idéntica y consistente del registro de transacciones. Si bien en su concepción inicial las transacciones en un bloque se asociaban comúnmente a movimientos financieros [14], la flexibilidad inherente de la tecnología blockchain permite que los bloques contengan cualquier tipo de información estructurada [18]. Esta versatilidad ha sido el motor para el desarrollo de aplicaciones más complejas, destacando entre ellas los contratos inteligentes [15].

2.1.2. Contratos Inteligentes

Los *smart contracts*, o contratos inteligentes, son programas inmutables almacenados en una blockchain que se ejecutan automáticamente al cumplirse condiciones preestablecidas en su código [8]. Su función principal es automatizar procesos en entornos descentralizados, lo que reduce significativamente la dependencia de intermediarios humanos [19] y mejora la eficiencia operativa en múltiples sectores [15].

Un contrato inteligente se concibe como un conjunto de reglas y lógica de negocio codificadas. Cada contrato posee un código (las reglas) y un estado (la información dinámica) [17]. El código es inmutable una vez desplegado en la blockchain mediante una transacción, garantizando la permanencia de las reglas establecidas. Su estado, sin embargo, puede evolucionar a medida que se interactúa con el contrato a través de transacciones. Es importante destacar que, si bien se describen como "auto-ejecutables" por su automatismo al cumplir condiciones, su ejecución es llevada a cabo por los nodos de la red que validan las transacciones e integran los cam-

bios de estado en la cadena [17]. Tanto el código como el estado del contrato se almacenan en la blockchain, asegurando su transparencia y disponibilidad pública. Por ejemplo, un contrato inteligente podría gestionar un sistema de votación, donde los participantes envían sus votos y el contrato contabiliza automáticamente los resultados al finalizar el periodo de votación. En la Figura 2.7 se ilustra el proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente, describiendo las etapas desde su definición hasta su implementación y ejecución en la blockchain.

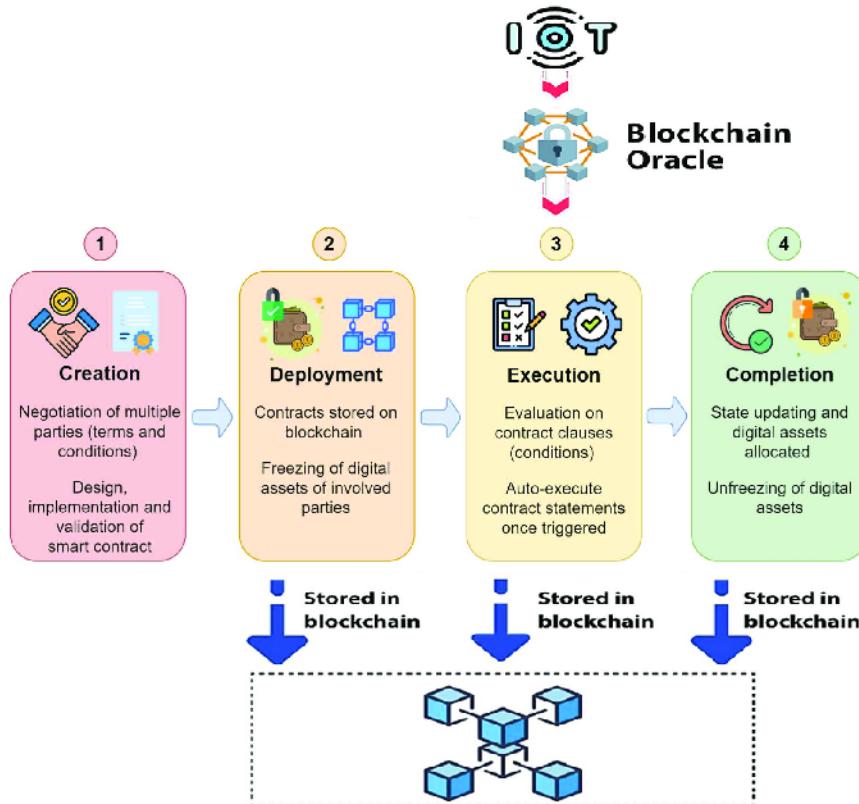


Figura 2.7: Proceso de creación y ejecución de un contrato inteligente

Para el desarrollo y ejecución de contratos inteligentes, se emplean lenguajes de programación específicos adaptados a cada plataforma blockchain [18]. Un ejemplo prominente es *Solidity* [20], utilizado en Ethereum, un lenguaje orientado a objetos diseñado para esta finalidad. Estos contratos pueden interactuar entre sí y con el estado global de la blockchain, habilitando la creación de aplicaciones descentralizadas (conocidas también como *dApps*, por sus siglas en inglés) que operan de forma autónoma y sin intermediarios en la red [17].

Sin embargo, los contratos inteligentes enfrentan limitaciones inherentes a las infraestructuras blockchain, principalmente en términos de escalabilidad [21]. A diferencia de los sistemas centralizados que permiten ejecución paralela y optimización con bases de datos indexadas, los smart contracts operan bajo modelos de ejecución secuencial y replicación completa en cada nodo [20]. Esto impacta directamente su rendimiento y complejiza la implementación de algoritmos avanzados. Desde la perspectiva de la ingeniería de software, el desarrollo de contratos inteligentes introduce restricciones no triviales: el código inmutable, los costos asociados al almacenamiento en cadena, la ausencia de llamadas externas directas y los modelos de es-

tado global distribuido. Estas particularidades exigen la adopción de nuevas metodologías y prácticas de diseño seguro, control de flujos y validación estática, muchas de las cuales aún se encuentran en proceso de estandarización [11, 20].

En síntesis, los contratos inteligentes constituyen una herramienta computacional que expande las fronteras de la programación distribuida y descentralizada. Si bien su potencial transformador es innegable [20], su desarrollo robusto y seguro representa un desafío activo que abarca múltiples dominios de la computación: desde la teoría de lenguajes formales [22] y la arquitectura de sistemas distribuidos, hasta la verificación de software, la criptografía aplicada y la integración de datos externos confiables [20].

Debido a la aparición los contratos inteligentes, la tecnología blockchain ha trascendido su origen ligado a las criptomonedas para convertirse en un paradigma disruptivo con aplicaciones transversales en múltiples dominios [18, 23]. Se positionan como un componente fundamental y un impulsor clave de gran parte de las nuevas y complejas soluciones basadas en blockchain, especialmente aquellas que buscan automatizar procesos y gestionar la lógica de negocio directamente en la cadena [24]. Si bien los contratos inteligentes representan una tecnología prometedora, aún se encuentran en una etapa incipiente, lo que implica la existencia de numerosos aspectos por perfeccionar [20]. En un contexto más amplio, la tecnología blockchain, incluyendo a los contratos inteligentes, ofrece una serie de ventajas fundamentales y limitaciones inherentes que la distinguen de los sistemas de almacenamiento de datos tradicionales.

2.1.3. Desafíos y Oportunidades

Las características inherentes de la blockchain, detalladas previamente, se traducen en una serie de ventajas que la distinguen de tecnologías tradicionales. La descentralización propia de su diseño y la consecuente eliminación de intermediarios resultan en una mayor confianza [25] y eficiencia operativa al prescindir de autoridades centrales [24]. La arquitectura basada en registros inmutables garantiza transparencia y trazabilidad completa [24], permitiendo un historial verificable de cualquier activo o evento, lo cual es crucial para casos de uso como certificación [18], logística [18, 25] y gestión de residuos [8]. La inmutabilidad de los datos, reforzada por la seguridad criptográfica, asegura la integridad de la información [15] y una resistencia robusta a manipulaciones maliciosas y puntos únicos de falla [18]. Además, la capacidad de automatización de aplicaciones mediante contratos inteligentes optimiza la eficiencia y confiabilidad operativa al ejecutar condiciones lógicas de forma autónoma [18]. En conjunto, estas propiedades confieren a blockchain una aplicabilidad transversal que la consolida como una tecnología habilitadora para la transformación digital en sectores diversos como finanzas, salud, IoT, energía, educación y ciudades inteligentes.

Sin embargo, a pesar de sus beneficios, la tecnología blockchain también enfrenta desafíos y limitaciones significativos. Uno de los principales desafíos es la escalabilidad y el rendimiento [16]. Las blockchains actuales suelen presentar un bajo *throughput* en comparación con los sistemas centralizados [7], lo cual restringe su aplicación en escenarios de alta frecuencia tran-

sacional. Esto se debe inherentemente a la necesidad de alcanzar un consenso distribuido y a la replicación completa de datos en todos los nodos [16]. Otro reto importante es la interoperabilidad limitada, que dificulta la integración fluida entre distintas plataformas blockchain con infraestructuras externas preexistentes [16]. En entornos públicos, la privacidad es una preocupación, ya que, aunque los usuarios pueden operar de manera seudónima, la visibilidad total de las transacciones en la cadena puede comprometer datos sensibles [26, 27]. Además, existen vulnerabilidades técnicas inherentes, como el ataque del 51 %, el doble gasto, los ataques Sybil, y la posibilidad de errores en contratos inteligentes mal programados, que requieren atención constante [26]. La irreversibilidad de las transacciones, si bien es una garantía de seguridad, puede ser problemática ante vulnerabilidades de programación, errores o fraudes, ya que las operaciones registradas no pueden deshacerse [20]. Por último, las limitaciones de almacenamiento representan un desafío práctico, dado que los nodos deben almacenar volúmenes crecientes de información, lo cual no escala eficientemente en redes de gran tamaño [20].

Estos desafíos, aunque significativos, están siendo abordados activamente por la investigación y el desarrollo en la comunidad blockchain. La constante evolución de la tecnología y la aparición de nuevas soluciones buscan mitigar estas limitaciones, abriendo el camino para una adopción más amplia [7, 16, 20]. En este contexto de evolución y superación de barreras, la blockchain ha demostrado su potencial para transformar diversos sectores y abarcar numerosos casos de uso.

En el sector financiero, blockchain ha generado disruptión mediante soluciones para pagos directos (con las llamadas criptomonedas), emisión de bonos, transferencias internacionales y operaciones en mercados de capital [18]. Instituciones como Santander y la Bolsa de Comercio de Santiago han adoptado esta tecnología para simplificar transacciones, automatizar registros y eliminar intermediarios [18]. Gracias a su estructura descentralizada y sus mecanismos criptográficos, blockchain permite mejorar la trazabilidad de los activos financieros. Pero si bien su uso en finanzas ha sido el más destacado, la tecnología blockchain ha demostrado ser versátil y aplicable a una amplia gama de sectores, cada uno con sus propias necesidades y desafíos.

A nivel gubernamental, blockchain ofrece nuevas herramientas para la modernización del Estado. Permite la gestión segura y verificable de identidades digitales, la trazabilidad de procesos administrativos, y la implementación de sistemas de votación transparentes [23]. Iniciativas como la European Blockchain Partnership buscan establecer una infraestructura digital pública para servicios intergubernamentales [26]. Proyectos como QualiChain exploran aplicaciones en el sector público, como la verificación de credenciales profesionales y la gestión automatizada de elegibilidad en concursos públicos [26].

Para el sector de la salud, blockchain permite almacenar registros médicos de manera segura y distribuida, mejorando la interoperabilidad entre instituciones, garantizando la integridad de los datos y permitiendo un mayor control por parte de los pacientes [15]. También es utilizado en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica y en la supervisión de ensayos clínicos, donde se requiere un alto nivel de confianza y garantizar cumplimiento normativo [23].

Aplicaciones de blockchain en el rubro de la educación incluyen la emisión y verificación de certificados académicos inmutables y descentralizados. Universidades como Nicosia o la de Murcia ya utilizan blockchain para certificar diplomas y logros [26]. Iniciativas como Blockcerts o el pasaporte educativo propuesto por la Unión Europea buscan facilitar la movilidad académica y reducir la falsificación documental. También se exploran aplicaciones como exámenes autoevaluables con contratos inteligentes, recompensas por desempeño y la gestión segura de registros estudiantiles [26].

También se está utilizando tecnología blockchain para crear mercados descentralizados para el comercio de energía entre pares. En este caso, su uso mejora la gestión de certificados de energías renovables, y optimiza la trazabilidad de producción y consumo energético [15, 23].

En el ámbito de la gestión de la cadena de suministro (SCM), blockchain proporciona una plataforma confiable para garantizar la trazabilidad, autenticidad y visibilidad en tiempo real de productos y materiales [24, 28]. Empresas como IBM, Maersk y FedEx han implementado soluciones blockchain para monitorear inventarios, registrar pagos y reducir disputas logísticas [16]. Casos como el de Dervinsa en Argentina, que certifica la calidad de productos derivados de residuos de vinificación, y otras iniciativas que aplican trazabilidad a alimentos y textiles, muestran cómo esta tecnología fortalece el control de calidad y la confianza en los mercados [18]. Además, en contextos más amplios, blockchain permite una sincronización eficiente entre departamentos, la reducción de riesgos de falsificación y la mejora general de la sostenibilidad operativa [15].

Dentro de modelos de economía circular, blockchain se posiciona como un facilitador para monitorear ciclos de vida de productos y materiales, ofreciendo transparencia y responsabilidad en la gestión de residuos [7, 8]. Diversos tipos de residuos, desde plásticos y vidrio hasta electrónicos y biomédicos, pueden ser gestionados de manera más eficiente mediante el uso de contratos inteligentes que automatizan verificaciones, recompensas e interacciones entre actores de la cadena [7]. Asimismo, han surgido propuestas innovadoras como la generación de pasaportes digitales de productos y esquemas de incentivos sostenibles, promoviendo hábitos de consumo responsables y nuevos modelos de negocio circulares [7].

En IoT, facilita la recolección y gestión segura de datos en tiempo real [15]. En contabilidad y auditoría, posibilita libros contables distribuidos con transparencia total y reducción de fraudes [18]. También se emplea en caridad y donaciones, trazabilidad inmobiliaria y movilidad inteligente [18].

Estos variados casos de uso evidencian cómo blockchain puede transformar modelos tradicionales mediante estructuras distribuidas, reglas codificadas y registros inmutables. Su implementación efectiva puede contribuir a una mayor eficiencia, confianza y sostenibilidad en distintas áreas del desarrollo económico, social y tecnológico.

Uno de los ámbitos donde esta tecnología está adquiriendo un protagonismo creciente es en la economía circular. La necesidad de trazar el flujo de materiales, certificar la autenticidad de los procesos productivos y garantizar la gestión responsable de residuos ha posicionado a

blockchain como una herramienta protagónica para habilitar modelos circulares sostenibles. En particular, su capacidad para registrar datos inmutables y automatizar interacciones mediante contratos inteligentes permite estructurar sistemas de trazabilidad que no sólo mejoran la eficiencia, sino que también fortalecen la confianza entre actores y fomentan la rendición de cuentas [24, 25]. A continuación, se analizará con mayor profundidad el uso de blockchain para trazabilidad de materiales en la cadena de suministros y para la implementación de estrategias de economía circular.

2.2. Economía Circular

La economía circular es un enfoque alternativo al modelo económico lineal tradicional, que nace con el objetivo transformar de manera sostenible la forma en que la sociedad produce, consume y gestiona los recursos naturales.

Desde la Revolución Industrial, la economía global ha operado principalmente bajo un modelo lineal de “extraer, producir y consumir”, caracterizado por la explotación de recursos naturales y la generación masiva de residuos [29]. En este modelo económico, los recursos son extraídos de la naturaleza, transformados en productos, consumidos y finalmente desechados al terminar su vida útil. Este enfoque, aunque ha impulsado un crecimiento económico mundial sin precedentes, ha generado sobreexplotación y degradación de ecosistemas. La deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación del agua, generación masiva de residuos y escasez de recursos no renovables son algunas de las consecuencias negativas de este enfoque extractivo a gran escala. A medida que la población mundial y la demanda de recursos continúan creciendo, la insostenibilidad de este modelo a largo plazo se hace cada vez más evidente [3].

En contraste con la economía lineal, la economía circular propone un sistema en el que los recursos se mantienen en uso durante el mayor tiempo posible, se reciclan y se reutilizan, minimizando la generación de residuos y reduciendo la extracción de materias primas [30]. La economía circular propone un cambio radical de paradigma, al concebir los sistemas productivos y de consumo como ciclos cerrados. Este enfoque se basa en los principios de diseño ecológico, la reutilización de materiales y la regeneración de los sistemas naturales, con el objetivo de crear un sistema económico más sostenible y resiliente. La diferencia estructural entre la economía lineal y la economía circular se hace evidente al ilustrar el flujo de recursos en ambos modelos, como se muestra en la Figura 2.8.



Figura 2.8: Comparación entre la economía lineal y la economía circular

En el enfoque lineal, la cadena de suministro de materiales se organiza como un proceso unidireccional: los recursos son extraídos, transformados en productos, consumidos y finalmente desechados. Este modelo ignora el valor residual de los materiales, no contempla mecanismos para reincorporar los productos al ciclo productivo una vez finalizada su vida útil y, en consecuencia, genera una creciente acumulación de residuos. En contraste, la economía circular redefine el papel de la cadena de suministros, transformándola en una red cerrada y regenerativa. Con este enfoque, la cadena se vuelve más dinámica e interdependiente, integrando bucles de retroalimentación entre los diferentes actores de la cadena de valor, incluyendo a consumidores, productores, proveedores y gestores de residuos.

A nivel sistémico, la economía circular se concibe como una evolución hacia un sistema más integrado, resiliente y sostenible. Su implementación es paulatina, en forma de transición desde el modelo lineal predominante hacia un modelo circular. Esta transición requiere una transformación estructural en los sistemas productivos en múltiples niveles: diseño de productos, procesos logísticos, distribución y gestión del fin de vida útil. Entre los habilitadores clave de este proceso de transición, se encuentra la trazabilidad, entendida como la capacidad de rastrear el origen, el uso y el destino de materiales y productos a lo largo de toda su vida útil. La trazabilidad permite verificar compromisos ambientales, controlar impactos, optimizar la logística inversa y empoderar tanto a consumidores como a instituciones para adoptar decisiones basadas en información confiable.

En la actualidad existen desafíos culturales, normativos y tecnológicos que dificultan la implementación de la economía circular a gran escala. La transición de los sistemas productivos requiere inversión en infraestructura, marcos regulatorios adecuados y políticas de incentivos claros. Asimismo, implica repensar la educación y la formación de trabajadores para adaptarse a nuevas dinámicas laborales. En muchos contextos, como América Latina y el Caribe, también se han identificado limitaciones institucionales y de gobierno que deben ser abordadas para permitir una adopción efectiva del modelo.

Es importante destacar que esta transición ya se encuentra en marcha. Numerosos países, regiones y sectores productivos han comenzado a incorporar principios circulares en sus estrategias de desarrollo, en muchos casos impulsados por marcos regulatorios, acuerdos internacionales y metas vinculadas a la sostenibilidad ambiental. En este contexto, las políticas públicas han asumido un rol central como motores de adopción, ofreciendo instrumentos normativos, fiscales y de gobernanza que facilitan la transformación del sistema económico.

2.2.1. Políticas sustentables

En el proceso de transición hacia modelos de desarrollo más sostenibles, la Unión Europea ha asumido un rol pionero en la implementación de políticas públicas alineadas con la economía circular. Iniciativas como el Pacto Verde Europeo y la Ley Europea del Clima han consolidado a Europa como un referente global en materia de sustentabilidad ambiental. Estas políticas no solo promueven la descarbonización de la economía, sino que también introducen principios

de circularidad en sectores como la industria, la energía, la movilidad y la gestión de residuos, reconfigurando las cadenas de suministro hacia sistemas más regenerativos, transparentes y trazables.

Sin embargo, el mayor hito internacional en la construcción de una visión compartida sobre sustentabilidad ha sido la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas en 2015. Este conjunto de 17 objetivos interconectados, acompañados por 169 metas y más de 230 indicadores, propone una agenda universal que orienta las políticas públicas hacia un desarrollo económico, social y ambiental equilibrado para 2030.



Figura 2.9: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas

El objetivo general de los ODS es erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad para todas las personas. En relación con la economía circular, se identifican un conjunto de objetivos particularmente relevantes que guían tanto los marcos normativos como las estrategias de innovación en producción, consumo y gestión de residuos:

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.**¹ Promueve el acceso universal a fuentes de energía limpias, eficientes y modernas, fundamentales para la transición a una economía circular descarbonizada.
- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.**² Plantea la necesidad de gestionar de manera integrada los recursos urbanos, incluyendo residuos, infraestructura y movilidad, en articulación con una trazabilidad eficiente de los flujos materiales.
- **ODS 12: Producción y consumo responsables.**³ Es el núcleo del paradigma circular, impulsando el diseño sostenible de productos, el uso eficiente de recursos, la minimización de residuos y la promoción de modelos de cadena de suministro regenerativos.
- **ODS 13: Acción por el clima.**⁴ Vincula la circularidad con la reducción de emisiones y la adaptación al cambio climático, incentivando políticas que rediseñen los sistemas productivos de alto impacto ambiental.

¹ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

³ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

⁴ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

Los ODS han generado un marco de referencia común que ha influido fuertemente en las agendas de sostenibilidad a nivel global, incluyendo América Latina. Aunque en la región la adopción de políticas circulares aún es incipiente en comparación con Europa, se observan avances significativos en la última década. Por ejemplo, varios países han comenzado a incorporar la responsabilidad extendida del productor, prohibiciones de plásticos de un solo uso y normativas orientadas a la reutilización y reciclado de materiales. Estas políticas buscan reestructurar las cadenas de valor y fomentar prácticas productivas y logísticas compatibles con los principios de circularidad.

En Argentina, la Estrategia Nacional de Consumo y Producción Sostenibles se destaca como el instrumento central para avanzar hacia la economía circular. La estrategia integra medidas normativas, educativas, tecnológicas y financieras, orientadas a fortalecer la sostenibilidad en toda la cadena de producción y consumo. Promueve activamente el uso de tecnologías limpias, la gestión sostenible de recursos, y la incorporación de criterios ambientales en compras públicas, reconociendo el rol central de la trazabilidad como mecanismo para garantizar la transparencia, eficiencia y cumplimiento normativo en los sistemas productivos y sus cadenas de suministro.

Estas políticas dejan ver que la transformación hacia una economía circular no puede pensarse sin una reconfiguración de las cadenas de suministro, que constituyen la columna vertebral de los sistemas productivos. La implementación de políticas sustentables, tanto en Europa como en América Latina, ha puesto en evidencia la necesidad de contar con mecanismos que permitan monitorear, verificar y optimizar el flujo de materiales a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos. En la siguiente sección se abordará con mayor detalle cómo se articula esta relación entre cadenas de suministro y trazabilidad, y cuál es su rol estratégico en la transición hacia un modelo económico circular.

2.2.2. Cadena de suministro

En el contexto de la economía circular, la cadena de suministro asume una nueva lógica de funcionamiento. Pasa de ser una secuencia finita de pasos que culminan con el consumo y disposición del producto, a transformarse en un sistema cíclico, en el cual los productos son diseñados para permanecer en uso el mayor tiempo posible y ser reutilizados, reacondicionados o reciclados.

La cadena de suministro constituye el entramado logístico, operativo y estratégico que permite el flujo de materiales, información y recursos desde la extracción de materias primas hasta la llegada de un producto al consumidor final. Este sistema complejo involucra a múltiples actores: proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas, consumidores y, en el caso del modelo circular, gestores de residuos y autoridades regulatorias. Su objetivo es garantizar que los bienes y servicios se produzcan y entreguen de manera eficiente, segura y rentable.

A lo largo de los años, las cadenas de suministro se han establecido para maximizar la eficiencia

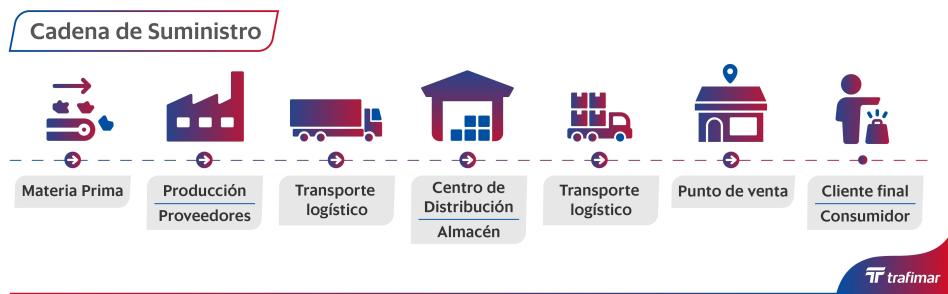


Figura 2.10: Componentes de una cadena de suministro

y reducir costos en la producción de productos. Con este objetivo claro, es que se ha dividido el proceso en etapas y se aplican herramientas, procesos y tecnologías diversas para optimizar cada una de ellas, desde la adquisición de materias primas hasta la distribución final. Sin embargo, la maximización de la eficiencia en este modelo lineal, sin preocuparse por el destino del producto luego de su uso, ha generado efectos secundarios adversos en el medioambiente que, como ya se mencionó, han llevado a la necesidad de un modelo sostenible en el tiempo.

Transicionar una cadena de suministros desde un modelo lineal hacia uno circular implica una inversión en rediseño de productos, procesos y creación de nuevas relaciones y colaboraciones entre los actores involucrados. En muchos casos los distintos actores de la cadena lo perciben como una inversión sin retorno inmediato o como un costo adicional, lo que dificulta su adopción. Sin embargo, las políticas sostenibles y regulaciones previamente mencionadas, entre otras, están impulsando a las empresas a adoptar prácticas circulares, no solo por responsabilidad social, sino también por la presión del mercado y de las autoridades reguladoras.

Para diseñar una cadena de suministros circular, la trazabilidad se posiciona como la herramienta que permite mantener y mejorar la eficiencia y costos, mientras que permite incorporar al final de la cadena las etapas de disposición, reciclaje y reutilización de materiales. Sin una trazabilidad robusta en cadenas donde intervienen múltiples organizaciones y tecnologías, es difícil garantizar que los materiales se manipulen de manera adecuada, se traten y reciclen y efectivamente se reincorporen al ciclo productivo.

La trazabilidad es la capacidad de seguir el recorrido completo de un producto, material o componente a lo largo de toda la cadena de suministro, desde su origen hasta su destino final. Su objetivo principal es reconstruir el historial de producción, transformación y movimiento de un bien, permitiendo conocer su composición, ubicación, responsables y condiciones de manejo en cada etapa del proceso. Por ejemplo, aplicando trazabilidad en la producción de vino se puede conocer la parcela de origen de la uva, la fecha de la vendimia y el proceso de añejamiento, permitiendo al consumidor verificar su autenticidad y al productor identificar rápidamente cualquier problema en un lote. Otro ejemplo frecuente es la trazabilidad de residuos peligrosos, que permite verificar que la disposición final del residuo se hizo correctamente para evitar riesgos de salud o ambientales. La información permite verificar la autenticidad del producto, asegurar estándares de calidad, cumplimiento normativo, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental. Procesos de trazabilidad establecidos permiten también identificar riesgos y opor-

tunidades de mejora en la cadena, permitiendo optimizar la logística, reducir costos y riesgos asociados a errores, fraudes o contaminaciones, y mejorar la capacidad de respuesta ante incidentes o fallas. En la cadena de suministro, la trazabilidad se aplica de forma transversal, es decir, atraviesa e interconecta todas las fases del ciclo: desde el diseño y la fabricación, hasta la distribución, el consumo, la gestión de residuos y el reciclaje.

No obstante, la implementación de trazabilidad en la cadena de suministro conlleva desafíos importantes. Las cadenas de suministro tradicionales suelen estar fragmentadas y utilizar sistemas de información heterogéneos o poco interoperables. Muchos registros todavía se realizan en papel o en bases de datos centralizadas, lo que aumenta la vulnerabilidad frente a errores humanos, pérdidas de datos o manipulaciones. Además, la ausencia de estándares unificados y la reticencia a compartir datos entre organizaciones limitan la visibilidad total del flujo de productos y materiales. Para abordar estos desafíos, se ha desarrollado un conjunto de tecnologías que fortalecen los sistemas de trazabilidad. Entre las más utilizadas se encuentran los códigos de barras y las etiquetas RFID, que permiten la identificación automática de productos mediante etiquetas físicas; los sensores IoT, que capturan datos en tiempo real sobre condiciones ambientales o de transporte; los sistemas ERP y de gestión logística digitales, que centralizan y organizan la información operativa; y, más recientemente, la tecnología blockchain se está posicionando como solución para unificar a todos los actores de la cadena aportando una nueva capa de transparencia entre etapas y resolviendo problemas de confianza entre los diferentes actores.

La tecnología blockchain en la cadena de suministros permite registrar cada transacción o evento de la cadena en una base de datos digital descentralizado e inalterable. Esto garantiza que todos los actores tengan acceso a un historial común y verificable, reduciendo la necesidad de intermediarios y auditores externos. Combinando contratos inteligentes y plataformas de análisis de datos, la trazabilidad basada en blockchain permite no solo conocer lo que ocurrió, sino también automatizar respuestas ante condiciones predefinidas, reduciendo los tiempos de reacción y aumentando la confianza entre las partes. El uso de blockchain en este contexto aporta un aumento significativo en la seguridad, transparencia, precisión de datos, eficiencia, responsabilidad y confianza entre actores. Esta tecnología ya se está utilizando para trazabilidad en diversos sectores como la agricultura, alimentos, industria textil y medioambiente. Por ejemplo, en el sector alimenticio, impulsa el valor percibido del producto y la calidad, además de fortalecer la confianza entre las partes interesadas. Para el sector industrial, se enfoca en la planeación y el intercambio de información para una mayor sostenibilidad. En el sector textil, mejora los procesos internos, la trazabilidad y previene la falsificación. Además, es posible combinar tecnología Blockchain con IoT y otros sistemas digitales ya implementados en la cadena de suministros. Esta combinación puede proporcionar soluciones aún más eficientes para la cadena de suministro, automatizando la recopilación de datos confiables y aumentando los beneficios para las partes interesadas.

La trazabilidad basada en blockchain ya se está aplicando en la cadena de suministros de diversos sectores con el objetivo de transicionar a una economía circular. Su adopción aún está en

desarrollo, pero su potencial para optimizar la trazabilidad y la sostenibilidad en la gestión de residuos es ampliamente reconocido. Aplicar trazabilidad para la economía circular permite unir la producción con el reciclaje, posibilitando no solo verificar el cumplimiento de estándares ambientales y sociales en gestión de residuos, sino también optimizar el uso de recursos, reducir desperdicios y fomentar la reutilización y el uso de materiales reciclados de calidad en nuevos productos. A continuación, se explorará cómo se articula el proceso de producción y reciclaje en la economía circular, y cómo la trazabilidad digital puede potenciar este ciclo.

2.2.3. Proceso de producción y reciclaje en la economía circular

En el marco de la economía circular, los procesos de producción y reciclaje dejan de concebirse como etapas aisladas y unidireccionales para integrarse en un sistema dinámico y regenerativo. En este esquema, la cadena de suministros del proceso productivo incluye la gestión de residuos y la reinserción de materiales reciclados en nuevos ciclos productivos.



Figura 2.11: Ciclo productivo de la economía circular

El proceso de producción comienza propiamente con la etapa de diseño, donde se decide la composición de los productos considerando criterios de ecoeficiencia, reutilización y reciclabilidad. Aquí intervienen diseñadores, ingenieros y proveedores de materias primas, quienes priorizan materiales reciclados o de bajo impacto ambiental. A continuación, durante la fabricación, los procesos industriales buscan reducir el uso de recursos y minimizar las emisiones, integrando tecnologías limpias y eficientes. En esta fase, los productos terminados o semielaborados quedan registrados con información detallada sobre su origen, composición y trazabilidad, lo cual permite una futura gestión más eficiente de su reciclaje. Tras su elaboración, los productos son distribuidos a través de canales logísticos que buscan optimizar los costos e impacto ambiental del transporte y almacenamiento.

Una vez que los productos son utilizados por los consumidores, comienza el ciclo inverso de va-

lorización. Cuando estos artículos llegan al fin de su vida útil (y ya no pueden ser reutilizados), se convierten en residuos que deben ser recolectados, transportados, clasificados y reciclados o reacondicionados. Este proceso, conocido de forma genérica como reciclaje”(sin distinguir si el destino final es reacondicionamiento o reciclaje), involucra a recolectores, centros de acopio, plantas de tratamiento, recicladores industriales y fabricantes secundarios. Durante la recolección, tecnologías como sensores IoT, lectores de códigos QR o etiquetas RFID permiten registrar información sobre la identidad del recolector, la cantidad, el tipo y las condiciones del residuo. Esta información permite monitorear flujos de materiales y brindar transparencia en la cadena. En el primer paso del proceso de reciclaje, los residuos son transportados a instalaciones donde se clasifican y segregan según su tipo y calidad. Este paso es fundamental para evitar contaminaciones cruzadas entre materiales distintos y asegurar un reciclaje efectivo. Posteriormente, los materiales seleccionados se someten a procesos de reciclaje o reacondicionamiento, reincorporándolos al sistema productivo como insumos o productos reutilizables. En todo este proceso, tecnologías como blockchain pueden documentar cada transacción o transformación del material, documentando la integridad del proceso y fomentando la confianza entre los actores.

El esquema de la Figura 2.12 ilustra las distintas aplicaciones posibles de la tecnología blockchain en cada etapa del ciclo completo de economía circular. En este sistema ilustrado, la tecnología blockchain conecta las etapas en un flujo de información unificada, formando un sistema de trazabilidad digital que permite el seguimiento de los materiales desde su origen hasta su reincorporación al sistema o disposición final.

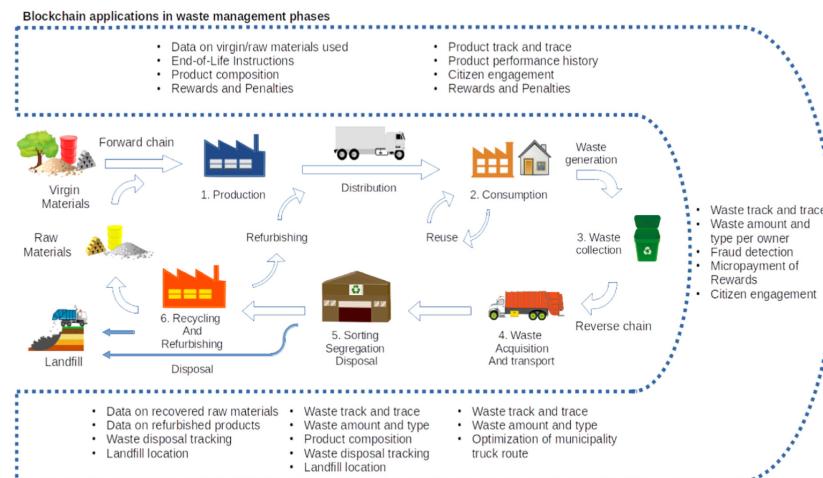


Fig. 2. Representation of the macro phases of a waste management system (from 1 to 6) and the related applications of the blockchain technology, in a circular economy model.

Figura 2.12: Usos de la tecnología blockchain en las etapas de la economía circular [7]

El proceso de reciclaje varía en complejidad dependiendo del material. Existen diversos materiales reciclables, cada uno con características particulares. El papel y cartón son ampliamente reciclados y fáciles de recolectar, mientras que los metales (como el aluminio, el acero o el cobre) conservan sus propiedades tras múltiples ciclos. Los residuos electrónicos presentan un alto valor por su contenido en metales preciosos, aunque requieren procesos especializados para su desmontaje. Los plásticos representan un desafío por su heterogeneidad, pero pueden reciclar-

se eficientemente si se rediseñan los envases y se simplifican sus composiciones. Los residuos orgánicos son compostables o pueden aprovecharse energéticamente en caso de no mezclarse con residuos no reciclables. Finalmente, el vidrio destaca como el material circular por excelencia: puede reciclarse infinitas veces sin perder calidad, su estructura es químicamente estable, y su reciclaje requiere menos energía que su producción original. Estas cualidades lo convierten en un insumo ideal para sistemas de economía circular bien diseñados.

2.2.4. Cadena de suministro del vidrio

El vidrio es uno de los materiales más representativos de la economía circular por su capacidad única de ser reciclado indefinidamente sin perder calidad. Esta propiedad lo convierte en un recurso estratégico para reducir la demanda de materias primas vírgenes, minimizar residuos y disminuir la huella de carbono asociada a la producción industrial. A diferencia de otros materiales cuyo reciclaje implica degradación, el vidrio conserva íntegramente sus características físicas y químicas, permitiendo su reintegración al ciclo productivo tantas veces como sea necesario. En la Figura 2.13 se muestra el ciclo de vida del vidrio en un modelo de economía circular, que abarca desde la extracción de materias primas hasta su reincorporación como materia prima en nuevos productos, exemplificando el caso de los envases de vidrio.

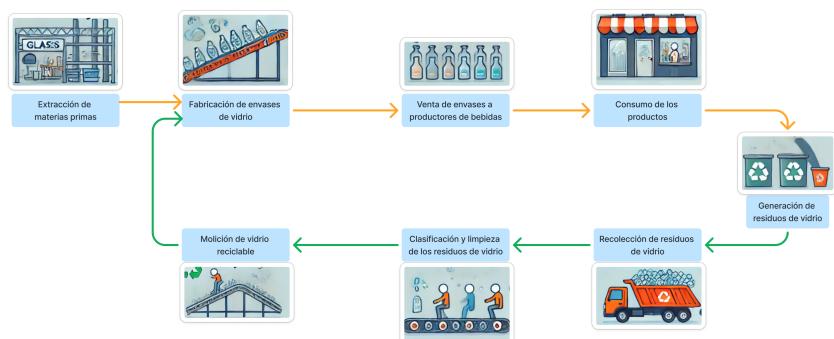


Figura 2.13: Ciclo de vida de envases de vidrio en un modelo de economía circular

El proceso comienza con el diseño del producto, etapa clave para asegurar su durabilidad, reutilización y posterior reciclabilidad. Por ejemplo, en la producción de envases de vidrio, en esta etapa se deciden aspectos como color, forma y composición del envase para optimizar durabilidad, reciclabilidad y aspectos estéticos. Luego del diseño, sigue la producción industrial, donde se funden arena, sosa y caliza a altas temperaturas, frecuentemente combinadas con calcín (vidrio reciclado triturado) para reducir el consumo energético y demanda de materiales vírgenes. La especial reciclabilidad del vidrio se hace visible en esta etapa, ya que la calidad del vidrio resultante es la misma sin importar la proporción de calcín y de materiales vírgenes utilizados (característica que, por ejemplo, no es igual para el plástico), por lo que los productores de vidrio no encuentran pérdidas potenciales al utilizar materiales reciclados. Luego, los

envases fabricados son distribuidos, utilizados para embotellar bebidas (por ejemplo, vino) y adquiridos por los consumidores, quienes (luego de consumir su contenido) pueden reutilizarlos, descartarlos (como basura común) o ingresarlos a circuitos de reciclaje. Para el correcto reciclaje del vidrio (y otros materiales) es importante el circuito de recolección diferenciada, que evita que el vidrio recicitable se mezcle con otros materiales que lo contaminen e imposibiliten su reciclaje. Los residuos de vidrio son recolectados por empresas especializadas o por los propios consumidores, quienes pueden depositarlos en contenedores específicos para su posterior tratamiento. Una vez recolectado, el vidrio es transportado a plantas de reciclaje donde se clasifica. En la clasificación se separa al vidrio de otros materiales reciclables que puedan haber sido mezclados y se separan los distintos tipos de vidrio (por ejemplo, por color), ya que algunas características, como el color y la composición química, son relevantes para el posterior uso del vidrio reciclado. Luego, el vidrio es triturado y limpiado para eliminar impurezas, como etiquetas o restos de alimentos, dando como resultado lo que se conoce como calcín. Esta etapa es crucial, ya que la pureza del material reciclado influye directamente en la calidad del vidrio producido. Finalmente, el calcín se funde nuevamente y se convierte en materia prima para nuevos envases, cerrando así el ciclo de vida del vidrio. Este proceso de reciclaje puede repetirse indefinidamente, lo que lo convierte en un modelo ejemplar de economía circular.

La cadena de suministros y reciclaje de envases de vidrio tiene una importancia estratégica en la provincia de Mendoza, por su estrecha vinculación con la industria vitivinícola, uno de los principales motores económicos de la región. La provincia cuenta con una única empresa que produce y recicla envases de vidrio a escala industrial: Verallia. Esta compañía internacional cubre la totalidad de la demanda local de botellas y frascos, fabricando envases para vinos, espumantes, cervezas, licores y alimentos. El proceso de producción en Verallia incluye desde la selección y mezcla de materias primas hasta la formación, inspección y distribución de los envases, con la integración progresiva de vidrio reciclado como parte del insumo.

Verallia ha reconocido públicamente que la mayor dificultad de su industria es la elevada emisión de dióxido de carbono, por lo que ha adoptado una estrategia dual orientada a optimizar el reciclaje y fomentar la reutilización del vidrio. Bajo esta lógica, ha desarrollado el programa "Vidrio, una acción transparente."^{en} en alianza con el Gobierno de Mendoza, mediante el cual se promueve la recolección de envases descartados, destinando los ingresos generados al apoyo de organizaciones benéficas. Esta iniciativa, aunque aún incipiente, representa un esfuerzo por avanzar hacia una cadena de suministro más circular y socialmente responsable en la provincia.

Sin embargo, el reciclaje de vidrio en Mendoza enfrenta desafíos estructurales. La tasa de recuperación aún es baja, las métricas oficiales son escasas y las políticas de incentivo son limitadas. La logística de recolección depende en gran medida de la voluntad ciudadana y carece de sistemas obligatorios o premiantes que aseguren su masividad. En este contexto, el rol de actores industriales como Verallia resulta central para impulsar transformaciones sostenibles en la cadena del vidrio, tanto mediante la innovación tecnológica como a través de la articulación público-privada.

Más allá del caso mendocino, el vidrio sigue siendo uno de los materiales más valiosos dentro de una economía circular bien implementada. Su durabilidad, estabilidad química, transparencia y capacidad de reciclaje total lo convierten en un insumo ideal para cerrar ciclos productivos sin pérdidas de calidad ni de valor. Avanzar hacia una cadena del vidrio plenamente circular requiere optimizar cada etapa, desde el diseño y la fabricación hasta la trazabilidad del reciclaje, consolidando sistemas logísticos eficientes, ciudadanos comprometidos y políticas públicas robustas que garanticen su sostenibilidad a largo plazo. A continuación, se explorarán los proyectos y trabajos relacionados que han abordado la trazabilidad y el reciclaje de vidrio, así como otras iniciativas vinculadas a la economía circular y la sostenibilidad que plantean e implementan soluciones innovadoras para mejorar la gestión de residuos y fomentar prácticas responsables en la cadena de suministro.

2.3. Proyectos y Trabajos Relacionados

La tecnología blockchain ha emergido como una herramienta poderosa para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro, ofreciendo un registro inmutable y transparente de transacciones que permite rastrear el movimiento de productos desde el origen hasta el consumidor final. Esta característica fortalece la confianza entre los actores al garantizar la autenticidad y la integridad de la información. Numerosos trabajos y proyectos han explorado la aplicación de blockchain en la cadena de suministro, especialmente en el contexto de la economía circular y la sostenibilidad. A continuación, se presentan algunos ejemplos destacados que ilustran cómo esta tecnología puede contribuir a mejorar la trazabilidad y fomentar prácticas responsables en la gestión de residuos para la economía circular.

Un ejemplo en este ámbito es Signeblock (España), con su solución Gouze, que busca mejorar la transparencia, seguridad, eficiencia y trazabilidad en los procesos de diversas industrias. Signeblock permite registrar cada paso del proceso productivo y de distribución en la blockchain, asegurando acceso personalizado y centralizando la información en un gestor documental. Ofrece digitalización y notarización de procesos, certificación blockchain para garantizar la inalterabilidad, y códigos QR para compartir información detallada con el consumidor, lo que fortalece la reputación de marca. Las limitaciones de estas soluciones suelen centrarse en la interoperabilidad con sistemas preexistentes y la resistencia organizacional a compartir datos entre diferentes actores de la cadena.

El trabajo "Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology" de Baralla et al. investiga el uso de blockchain particularmente en la gestión de residuos para la economía circular. Propone que esta tecnología puede ofrecer beneficios como la trazabilidad de los residuos en todas sus etapas, mecanismos de prevención de fraude e incentivos para comportamientos virtuosos. Permite monitorear tanto la cadena inversa (gestión de residuos hasta la regeneración de materia prima) como las fases de la cadena directa (producción a consumo), con el fin de reducir el consumo de material virgen y monitorear la reutilización. El sistema puede implementar la lógica de gestión de residuos mediante contratos

inteligentes que se ejecutan automáticamente, permitiendo políticas de recompensa o penalización. Sin embargo, los autores advierten que para aplicar este modelo en casos reales, es necesario enfocarse en una categoría específica de residuos con una cadena de disposición bien definida. Además, señalan que la tecnología blockchain aún se encuentra en etapas iniciales de desarrollo, enfrentando problemas de escalabilidad, privacidad de datos y bajo rendimiento en blockchains públicas.

El "Modelo ZERO para el Reciclaje de Plásticos con Tecnología Blockchain", descrito por Sandhiya et al. (2020), se enfoca en el reciclaje de plásticos. Este modelo utiliza códigos QR, IoT y blockchain para crear un sistema de trazabilidad inmutable que asegura transparencia y responsabilidad a lo largo de todo el proceso de reciclaje. Su objetivo es superar los desafíos de auditoría al desarrollar un sistema auditável, resistente al fraude y económicamente práctico. Cada producto plástico se etiqueta con un código QR único para trazabilidad, se utiliza una ontología para reducir ambigüedades, y se emplean "binos inteligentes" que solo aceptan plásticos con códigos QR activos. Técnicamente, los códigos QR se graban molecularmente en el polímero para evitar manipulaciones, y la información se registra en la blockchain creando un "gemelo digital" del producto. Las máquinas de reciclaje están equipadas con lectores de QR para verificar la validez y pre-clasificar los plásticos automáticamente. El sistema incentiva la participación con recompensas monetarias para usuarios y recolectores, estableciendo una cadena de incentivos que estimula la eficiencia en cada eslabón. Este modelo busca mejorar la calidad del reciclaje, crear conciencia, aumentar la transparencia y reducir costos. A su vez, el trabajo de Bhubalan et al. también explora la integración de blockchain y marcadores moleculares para el manejo sostenible de residuos plásticos. Subrayan que los sistemas actuales de gestión de desechos no procesan efectivamente los residuos plásticos. Proponen que la blockchain, combinada con marcadores moleculares para rediseñar químicamente los plásticos, puede lograr un reciclaje cerrado y mantener el valor de los plásticos sintéticos por un tiempo prolongado. Sin embargo, el artículo examina los altos costos asociados con la implementación de blockchain, cuestionando su rentabilidad para plásticos de un solo uso. La combinación de tecnologías ofrece una vía prometedora para soluciones más efectivas contra la contaminación plástica al proveer información del producto físico que es registrada y verificada por la blockchain.

Existen múltiples aplicaciones productivas basadas en blockchain que buscan alcanzar mejores resultados en el reciclaje y proporcionar ventajas tanto a productores como a consumidores, abordando la trazabilidad desde el inicio de la cadena de suministro.

Circularise (Holanda) es una plataforma líder que ofrece pasaportes digitales de productos para la trazabilidad de extremo a extremo y el intercambio seguro de datos en cadenas de suministro industriales. Permite rastrear la sostenibilidad de los productos más allá del primer nivel de proveedores, registrando el origen, composición del material y datos ambientales, respaldados por la cadena de custodia impulsada por blockchain. Facilita la recolección de datos primarios para evaluaciones del ciclo de vida (LCA) y cálculo de la huella de carbono del producto (PCF). Ayuda al cumplimiento regulatorio y la agilización de auditorías, a la

vez que asegura la privacidad de los datos y ofrece integración con sistemas ERP existentes. Adopta un enfoque abierto e interoperable para eliminar silos de datos y ha contribuido a la certificación ISCC Plus, utilizando una blockchain pública descentralizada para garantizar la credibilidad de las afirmaciones de sostenibilidad.

Circulor (Reino Unido) es una plataforma de SaaS empresarial privada que ofrece soluciones avanzadas para la trazabilidad y sostenibilidad en cadenas de suministro industriales. Utiliza tecnología blockchain para proporcionar seguimiento exhaustivo desde la fuente hasta el consumidor final, permitiendo a las empresas demostrar procedencia responsable, reducir emisiones y gestionar riesgos. Incluye interfaces de usuario intuitivas y se integra fácilmente con plataformas empresariales existentes mediante APIs. Sus productos de trazabilidad rastrean el origen de materias primas y el flujo actual de materiales a través de procesos de producción y transformaciones.

Varios proyectos e iniciativas alrededor del mundo han demostrado que la incorporación de incentivos tangibles es un factor clave para fomentar hábitos de reciclaje en los consumidores (sin importar la tecnología utilizada), impulsando así el desarrollo de una economía circular. Sistemas como los de Depósito y Reembolso (DRS), ejemplificados por el modelo PFAND en Alemania, buscan motivar la devolución de envases a través de un reembolso al consumidor. En España, Reciclos ofrece recompensas por el reciclaje de latas y botellas, mientras que en Argentina, Colmena premia a los usuarios con la criptomoneda JellyCoin y Greenly Points en Mendoza otorga puntos canjeables por beneficios locales al entregar residuos reciclables en puntos verdes. A nivel global, Plastic Bank en Canadá utiliza la tecnología blockchain para ofrecer tokens como incentivo a los recolectores de plástico en regiones empobrecidas, demostrando cómo las recompensas digitales pueden impulsar la participación y la transparencia en el flujo de residuos. Estas experiencias subrayan que, al ofrecer valor a cambio del material reciclable, se logra una mayor involucración ciudadana y se contribuye de manera significativa a cerrar los ciclos de vida de los productos.

Los proyectos y modelos revisados en esta sección demuestran el vasto potencial de la tecnología blockchain para transformar la gestión de residuos y las cadenas de suministro hacia modelos más sostenibles y circulares. Desde sistemas de incentivos simples hasta plataformas complejas de trazabilidad de extremo a extremo, la inmutabilidad, transparencia y descentralización de blockchain ofrecen soluciones prometedoras. No obstante, se identifican puntos débiles recurrentes en su aplicación actual, que incluyen la necesidad de un mayor desarrollo técnico y madurez de la tecnología, la superación de barreras organizacionales (como la reticencia a compartir datos y la falta de estandarización), los altos costos de implementación inicial, problemas de escalabilidad en redes públicas y el consumo energético en ciertos algoritmos de consenso, así como la aún incipiente regulación y falta de estándares comunes.

Es en este contexto donde se posiciona el presente trabajo de tesis. A pesar de los avances y el reconocimiento de la importancia del reciclaje de vidrio, especialmente en regiones como Mendoza con una fuerte industria vitivinícola, se observa una baja tasa de recuperación, escasez de métricas oficiales y limitaciones en las políticas de incentivos. Los programas existentes en

Argentina, si bien son un paso adelante, aún carecen de mecanismos obligatorios o premiantes que aseguren la masividad de la recolección diferenciada y no garantizan por sí mismos el reciclaje efectivo del material.

Este trabajo busca abordar estas brechas mediante el desarrollo de un prototipo de sistema de trazabilidad del vidrio basado en tecnología blockchain. Enfocado específicamente en la cadena de suministro del vidrio en el contexto mendocino, de forma que integra a todos sus actores desde la producción hasta su reintroducción en la cadena de valor. Este sistema no solo permite registrar y verificar cada etapa del ciclo de vida del vidrio, sino que también busca superar las limitaciones identificadas en los proyectos preexistentes al ofrecer una solución que facilite la valorización del vidrio, promoviendo una economía circular más transparente, eficiente y sostenible en la región. Se hace énfasis en la usabilidad, la integración de datos relevantes y la demostración de los beneficios tangibles para todos los participantes de la cadena.

3

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para llevar a cabo los objetivos propuestos en este trabajo final se define una metodología consistente que permita planificar y gestionar las diferentes tareas y recursos de manera ordenada. Este capítulo detalla la planificación del plan de trabajo y el desglose de actividades a través de las cuales se pretende llegar a obtener resultados (Sección 3.1). Luego se describe la metodología de investigación elegida para el estudio del estado del arte del reciclado de vidrio y la adopción de tecnología blockchain (Sección 3.2). Finalmente, se describe la metodología de desarrollo del prototipo tecnológico, comprendiendo las etapas de análisis de requerimientos, diseño, implementación, pruebas y despliegue (Sección 3.3).

3.1. Planificación del Plan de Trabajo

En esta sección se describen todos los pasos establecidos como parte del proceso necesario para desarrollar el prototipo basado en blockchain orientado a la trazabilidad y valorización del vidrio. En la Figura 3.1 se pueden observar las actividades que conforman el plan de trabajo para cumplir este objetivo. En primer lugar, comienza la formación (Actividad A) estudiando las bases de blockchain y los lenguajes de desarrollo asociados para poder discernir aquellas herramientas tecnológicas que sean más adecuadas para el desarrollo del software propuesto. Conforme avance el tiempo del trabajo final de grado se investigan los pormenores del reciclado, en particular, en el contexto regional de Mendoza (Actividad B). Una vez analizado el estado del arte y las tecnologías asociadas, se selecciona la metodología de trabajo que mejor se adapte al proceso de desarrollar software enfocado en trazabilidad y teniendo en cuenta las características únicas de utilizar blockchain (Actividad C). El proceso de desarrollo de software para una aplicación de trazabilidad sigue una serie de etapas planificadas y estructuradas para asegurar que el producto final cumple con los requerimientos y expectativas, como cualquier

otro software, por ende es necesario cumplimentar la serie de etapas previamente definidas en la Actividad C. Luego de seleccionar la metodología, se dedica un periodo de tiempo exclusivamente a las actividades relacionadas con el desarrollo de la aplicación prototipo (Actividad D): análisis de requisitos, diseño del sistema, implementación de los requerimientos, pruebas y validación y finalmente reimplementación si fuera necesario hasta alcanzar el despliegue final. Todo el proceso anteriormente descrito puede llegar a pasar por diferentes iteraciones de progreso si fuera necesario. Finalmente, este trabajo concluye con la escritura del documento final de tesina donde se registra el proceso ejecutado y los resultados alcanzados (Actividad E).

- **Actividad A:** completar la formación en blockchain y las tecnologías y plataformas relacionadas.
- **Actividad B:** realizar un estudio pormenorizado del estado actual del arte en todo lo relacionado con blockchain en el campo del reciclado. En particular, se orienta la búsqueda al reciclado de vidrio. Se analizan trabajos de la literatura como también aplicaciones blockchain orientadas al tema (en caso de existir).
- **Actividad C:** definir los procesos de desarrollo del prototipo, haciendo hincapié en seguir los fundamentos de la ingeniería de software y planificando de forma concisa y clara.
- **Actividad D:** desarrollar la aplicación prototipo. Este desarrollo a su vez involucra las diferentes etapas de un proceso de desarrollo de software, desde análisis de requerimientos, diseño, implementación, evaluación, corrección del prototipo y despliegue. Todos estos pasos se aplican siguiendo una metodología específica, teniendo en cuenta las características particulares del sistema y que además permite llevar a cabo el objetivo general.
- **Actividad E:** Documentar en una memoria el proceso y resultados del trabajo realizado.

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9
Actividad A		X							
Actividad B			X						
Actividad C				X					
Actividad D					X				
Actividad E									X

Figura 3.1: Planificación de las actividades del plan de trabajo

En la Sección 3.2 se detalla la metodología de investigación para llevar a cabo la Actividad B de estudio del estado del arte. Luego, en la Sección 3.3 se describe la metodología de trabajo elegida para el proceso de desarrollo del prototipo tecnológico.

3.2. Metodología de Investigación

Para llevar a cabo la Actividad B, referida al estudio pormenorizado del estado del arte en blockchain y reciclado de vidrio, se adopta un enfoque de investigación mixto, que combina

la revisión sistemática de la literatura con la investigación de campo, incluyendo entrevistas y observaciones. Se selecciona esta metodología con el objetivo de comprender a profundidad el panorama actual de la aplicación de tecnologías emergentes en la gestión de residuos, identificando las tendencias, oportunidades y desafíos específicos del sector del vidrio, tanto a nivel global como en el contexto regional de Mendoza.

La recolección de datos se estructura en dos componentes principales: una revisión exhaustiva de la literatura académica y de proyectos aplicados, y la realización de investigación de campo mediante entrevistas y observaciones.

3.2.1. Revisión de la Literatura y Proyectos Aplicados

Dentro del marco de este trabajo, se realiza una investigación bibliográfica antes del desarrollo técnico, y nuevamente al finalizarlo para la redacción del informe. Se consultan bases de datos como Google Scholar, priorizando artículos de los últimos años, preferentemente desde 2022 en adelante, para asegurar la actualidad de la información. Las palabras clave utilizadas incluyen “blockchain”, “supply-chain”, “waste-management”, “traceability”, “smart contracts” y “circular economy”, combinadas para afinar los resultados. Se excluyen artículos que no aborden la integración de blockchain con alguna de las otras palabras clave o que sean previos a la fecha límite establecida, salvo casos de particular importancia. La prioridad es identificar estudios que cubran el ciclo completo de la cadena de suministro y el reciclaje. Esta revisión permite identificar los avances tecnológicos, los modelos teóricos propuestos y las brechas existentes en la investigación académica.

Adicionalmente, se lleva a cabo una investigación de proyectos aplicados en el mundo real, buscando soluciones existentes de trazabilidad en cadenas de suministro con blockchain, trazabilidad en reciclaje con blockchain, y sistemas de incentivos para el reciclaje (con o sin blockchain). Estas fuentes secundarias incluyen sitios web de proyectos, informes de organizaciones y artículos periodísticos relevantes. El objetivo es comprender las soluciones prácticas implementadas y sus resultados en diferentes contextos.

3.2.2. Investigación de Campo: Contexto Local y Global

Para obtener una comprensión profunda de la situación del reciclaje de vidrio, particularmente en la provincia de Mendoza, se realiza una investigación de campo. Como punto de partida, se lleva a cabo una revisión en internet de sitios web, artículos de diarios locales y boletines oficiales para documentar programas de reciclaje activos en la región y la presencia de empresas productoras relevantes.

Posteriormente, se realiza una entrevista semiestructurada con Lucía J., responsable del Área de Medio Ambiente de Verallia, la principal empresa productora de envases de vidrio en la región de Mendoza. La entrevista se condujo de manera telefónica, utilizando preguntas guía

predefinidas, pero con flexibilidad para explorar temas emergentes durante la conversación. La conversación fue grabada con consentimiento previo y luego transcripta, complementándose con notas tomadas durante la entrevista. Los detalles de esta entrevista se incluyen en el Apéndice D.

De manera oportuna, y aunque no es el motivo principal de este trabajo, se aprovecha una oportunidad profesional para realizar un viaje de investigación de dos semanas a Europa. Durante este viaje, se visitaron y estudiaron sistemas de reciclaje y programas de incentivos de reciclaje en tres países europeos. Las actividades incluyeron visitas a centros verdes, interacciones con organizaciones involucradas en el reciclaje, exploración de redes de comercios circulares u orientadas a la sustentabilidad, y encuentros con organizaciones dedicadas a promover la economía circular. Los hallazgos y observaciones de este viaje, documentados a través de notas y fotografías, se detallan en el Apéndice E.

3.2.3. Procesamiento y Análisis de Datos

La información recolectada de la literatura se organiza en un inventario de artículos, registrando su título, año, autor, palabras clave y principales aportes. Junto con los hallazgos de la investigación de proyectos aplicados, esta información fue sintetizada, resumida y redactada en el Marco Teórico (Sección 2), principalmente en la subsección de Proyectos y Trabajos Relacionados (Sección 2.3).

Para la información cualitativa obtenida de las entrevistas y observaciones en campo, se realiza un análisis de contenido temático. Las transcripciones y notas se revisan para identificar patrones, desafíos y oportunidades relevantes para el reciclaje de vidrio y la aplicación de blockchain en la región. Este análisis permite contrastar la teoría con la realidad local, identificar las necesidades específicas de los actores de la cadena y consolidar la base de conocimiento para la definición de los requisitos y el diseño del prototipo tecnológico.

3.2.4. Delimitación del Alcance

El presente trabajo se centra en la tecnología blockchain como eje principal debido a su naturaleza disruptiva y su potencial para transformar la trazabilidad y la gestión de datos. La elección de la aplicación orientada a la economía circular se justifica por la relevancia actual de este área de impacto y la necesidad de soluciones sostenibles. Particularmente, el dominio se delimita al vidrio, siguiendo la recomendación de investigaciones que sugieren que la especialización en un material particular permite obtener mejores resultados en usabilidad y tasas de reciclaje [13]. Esto se debe a la posibilidad de diseñar sistemas a medida de los procesos productivos y de reciclaje del material elegido. El vidrio en particular es seleccionado como material recicitable para desarrollar este trabajo por sus características de alta reciclabilidad y su significativo impacto regional en Mendoza (provincia vitivinícola) cuya principal industria productiva, el vino, depende en gran medida de los envases de vidrio.

3.3. Metodología de Desarrollo

Para llevar a cabo el desarrollo de un prototipo tecnológico que cumpla con los objetivos propuestos en este trabajo resulta necesario definir una metodología consistente que permita planificar y gestionar las diferentes tareas de manera ordenada. Durante la planificación del trabajo, se realizó una comparación de diversas metodologías de desarrollo de software (tradicionales y ágiles) y se hizo una evaluación con el objetivo de seleccionar la metodología más adecuada para las características de este trabajo. El detalle de la comparación y análisis se encuentra en el Apéndice F.

Como resultado del análisis y comparación de metodologías, se optó por una combinación del modelo en V para la estructura general del proceso de desarrollo de software y Kanban para la gestión de tareas diarias. El modelo en V, que es una extensión del modelo en cascada, está orientado a proyectos con requerimientos bien definidos (poco cambiantes) y donde la validación y verificación son relevantes, como es el caso de un prototipo de trazabilidad basado en blockchain. Este tipo de metodología es apropiada para proyectos basados en blockchain donde la inmutabilidad de los contratos inteligentes requiere una alta calidad y baja tolerancia a errores antes del despliegue. Por otro lado, Kanban se utiliza para gestionar las tareas diarias de manera ágil y flexible, permitiendo adaptarse a cambios menores en el proceso sin comprometer la estructura general del proyecto y sin generar una sobrecarga de trabajo innecesaria. Esta combinación permite mantener un equilibrio entre la estructura sistemática del modelo en V y la flexibilidad operativa de Kanban. Metodologías como Scrum o Extreme Programming (XP) fueron consideradas, pero se descartaron debido a la naturaleza del proyecto y el equipo, ya que en este trabajo no se requiere un enfoque iterativo e incremental tan marcado como el que estas metodologías proponen. Además, metodologías como Scrum requieren roles específicos y reuniones frecuentes que no son necesarias en este contexto, donde el enfoque está más en la planificación y ejecución de un prototipo concreto y definido.

3.3.1. Modelo en V

El desarrollo del prototipo siguió el modelo en V, una metodología de desarrollo de software que extiende el enfoque secuencial del modelo en cascada al emparejar cada fase de desarrollo con una fase de prueba correspondiente, formando una estructura en forma de "V". Con esta metodología se asegura una verificación y validación sistemática en cada etapa, permitiendo la detección y corrección temprana de errores y minimizando riesgos al final del proyecto. En la Figura 3.2 se ilustran las etapas del proceso. Se observa que los requisitos y componentes del sistema se detallan de forma iterativa en las etapas de la primera mitad descendente de la V. Una vez completada la codificación, el proceso asciende por el lado derecho de la V, donde cada etapa de definición previa es validada a través de pruebas específicas.

Las actividades de este trabajo se mapean a las fases del modelo en V de la siguiente manera:

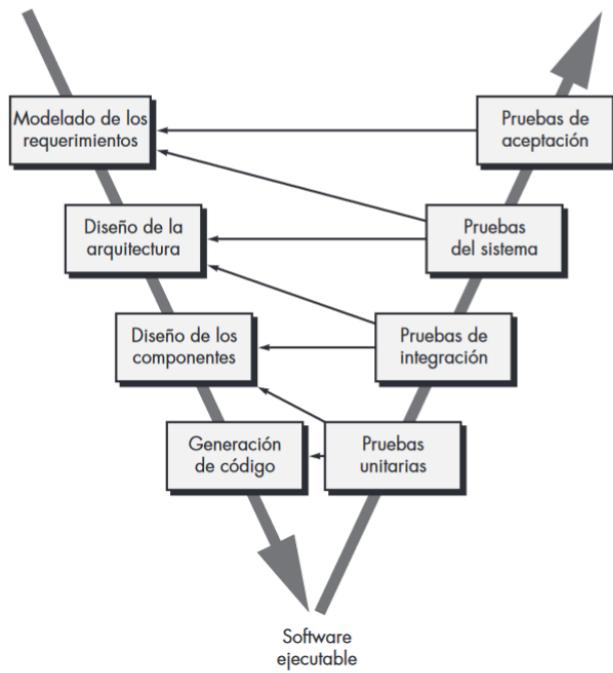


Figura 3.2: *Modelo de Desarrollo en V [31]*

Modelado de requerimientos: esta fase comprende la identificación y documentación detallada de los requisitos funcionales y no funcionales del prototipo. Los hallazgos se nutren directamente de la Metodología de Investigación previamente definida (Sección 3.2), que incluye la revisión del estado del arte en blockchain, gestión de residuos y trazabilidad, así como entrevistas y observaciones de programas de reciclaje existentes. El objetivo en esta etapa es comprender las necesidades específicas del sistema de trazabilidad del vidrio para definir un conjunto exhaustivo de requerimientos que aseguren que el prototipo aborde los desafíos identificados en la cadena de producción de envases de vidrio en la región. El resultado de esta fase es un documento de requisitos funcionales y no funcionales que sirve como base para las siguientes etapas del desarrollo. La ejecución y resultados de esta fase se detallan en el Capítulo 4.

Diseño (de arquitectura y componentes): el diseño del sistema se divide en dos etapas: diseño de arquitectura y diseño de componentes. En la primera etapa, se define la arquitectura general del sistema, incluyendo la selección de tecnologías y plataformas a utilizar, así como la estructura de los módulos principales y la división de responsabilidades entre ellos. En la segunda etapa, se realiza el diseño detallado de cada componente de los módulos del sistema, especificando las interfaces, protocolos de comunicación y estructuras de datos a utilizar. El diseño en etapas y previo a la implementación tiene el objetivo de garantizar que el sistema sea escalable, mantenable y cumpla con los requisitos definidos en la fase anterior. El resultado es un conjunto de documentos de diseño que guían la implementación del prototipo. Los detalles de estas dos fases de diseño se presentan en el Capítulo 5.

Generación de código: durante la fase de generación de código o implementación, se lleva a cabo la codificación del prototipo, cada módulo y sus componentes en las tecnologías elegidas

y especificaciones detalladas durante la etapa de diseño. Esta etapa es gestionada con el apoyo de Kanban para la organización y seguimiento de las micro-tareas para mantener un flujo de trabajo ágil y adaptable a los cambios menores que puedan surgir durante el desarrollo. El resultado de esta fase es un prototipo funcional que implementa los requisitos y diseños definidos previamente. En simultaneo con la generación de código se realiza la primer etapa de validación, que consiste en pruebas unitarias de cada componente desarrollado. Estas pruebas aseguran que cada componente funcione correctamente de forma aislada y cumpla con los requisitos funcionales especificados. Al finalizar esta etapa, el software ejecutable está listo para ser desplegado en un entorno de pruebas. Los detalles de la implementación y las pruebas unitarias se describen en el Capítulo 6.

Pruebas: el proceso de pruebas se lleva a cabo en múltiples etapas. Luego de las pruebas unitarias, se realizan pruebas de integración automatizadas para verificar que los diferentes módulos del sistema interactúan correctamente entre sí a través de sus interfaces. Estas pruebas aseguran que los datos fluyan adecuadamente dentro del sistema. Posteriormente, se llevan a cabo pruebas de sistema para evaluar el comportamiento del prototipo en su conjunto para validar que el sistema cumple con los requisitos funcionales y no funcionales definidos. Las pruebas de sistema incluyen pruebas manuales para validar consistencia de datos en el sistema y que el prototipo cumple con los requerimientos funcionales, mientras que pruebas automatizadas con herramientas permiten verificar los requerimientos no funcionales como rendimiento y seguridad bajo condiciones simuladas. Finalmente, se realizan pruebas de aceptación con un conjunto de usuarios voluntarios para validar que el prototipo cumple con los criterios de aceptación establecidos en la fase de modelado de requerimientos. Los detalles de las pruebas realizadas en estas etapas se presentan en el Capítulo 7.

3.3.2. Gestión del Proceso

Para asegurar una gestión eficiente del desarrollo, se implementaron herramientas y prácticas de control de proyectos. La documentación del proceso fue continua a lo largo de todas las fases del ciclo de vida del software. Las decisiones de diseño, problemas encontrados y soluciones aplicadas fueron registradas, sirviendo como base para la elaboración del informe final de tesis. Para el control de versiones del código fuente, se utilizó Git (junto con Github para la gestión de repositorios en la nube), lo que permitió un seguimiento detallado, seguro y ordenado de los cambios. Adicionalmente, se empleó la herramienta Jira para el seguimiento de incidencias, tareas y la evolución general del desarrollo, facilitando la planificación, el monitoreo del progreso, seguimiento de errores detectados y la gestión de tareas pendientes. Esta combinación de herramientas y metodologías permitió mantener un flujo de trabajo organizado, transparente y eficiente, alineado con las necesidades específicas del proyecto.

En los próximos capítulos se detalla el proceso de ejecución llevado a cabo en cada etapa, incluyendo los resultados obtenidos en cada una. En el Capítulo 4 se describe el proceso de modelado de requerimientos, donde se explica cómo se obtuvieron los requerimientos funcionales

y no funcionales, su priorización y la planificación del desarrollo. En el Capítulo 5 se aborda el diseño del sistema, incluyendo la elección de tecnologías, diseño de arquitectura de software, modelado de la interfaz de usuario y definición de los módulos principales del prototipo. Posteriormente, en el Capítulo 6 se detalla la implementación de cada módulo del sistema, integración de los módulos, pruebas unitarias realizadas y despliegue del prototipo en un entorno de pruebas similar a un entorno productivo. En el Capítulo 7 se describen las pruebas realizadas, tanto las pruebas de integración automatizadas como las pruebas de sistema manuales y las pruebas con usuarios. Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones del trabajo, resultados obtenidos, reflexiones sobre el proceso de desarrollo y oportunidades de mejora de este trabajo con recomendaciones para futuros trabajos relacionados con la trazabilidad y valorización del vidrio mediante tecnologías emergentes como blockchain.



MODELADO DE REQUERIMIENTOS

En esta sección cuento cómo arrancamos, cuáles fueron los pasos para conseguir información y a partir de qué datos modelamos los requerimientos y cómo. Cómo bajamos los requerimientos funcionales y no funcionales, y cómo los pulimos e iteramos. Cómo despriorizamos algunos requerimientos y por qué durante este proceso.

Cómo bajamos a jira estos requerimientos y armamos una planificación tentativa del desarrollo de estas funcionalidades.

Contar que estos requerimientos se usan para realizar el diseño de la solución de software.

5

DISEÑO DE SOLUCIÓN

En esta sección voy a tener que diferenciar entre ambos tipos de diseño. Primero armé la arquitectura del sistema, separando en bloques frontend/api/datos. Contar cómo decidí esta arquitectura. Explicar la comparación y elección de tecnologías para cada módulo. Fundamentar la elección de blockchain en base a la comparación que se hizo en el estado del arte. O hacer la comparación acá en vez de en el estado del arte? Explicar también las interfaces entre módulos (API rest en gral), pero si usé alguna librería para estas interfaces explicar cuál.

Luego explicar el diseño de componentes, que sería interno a cada bloque. Cómo elegí la arquitectura de frontend, como elegí clean arch en back y las librerías que usé en back. Cómo armé la arquitectura de contratos en la blockchain y el modelo de datos en sql.

Acá tengo que detallar la arquitectura de pantallas de front, la distribución de apis del back y la separación de contratos en blockchain.

Explicar la combinación de Ownership en SQL con los datos en la blockchain para un trackeo eficiente, confiable y no redundante de información.



IMPLEMENTACIÓN

La implementación fue el proceso más largo y se llevó a cabo siguiendo la planificación.

Explicar que se realizó desarrollo y unit testing de forma conjunta e intercalada.

Al ser un sistema modular pero interconectado, el desarrollo se realizó por módulo desde adentro hacia afuera y no por dominio. Es decir, primero se programó el 100

Cuando se tuvo el software ejecutable y testeado con unit testing en un entorno local, se procedió al despliegue en un entorno de pruebas. Contar sobre las plataformas donde se desplegó cada módulo, el por qué (son gratuitas y ya, me sirve para un trabajo académico). Explicar que se configuraron herramientas de despliegue en docker para modularización, evitar conflictos de dependencias y que en el futuro se pueda transicionar fácilmente a un entorno productivo sin problemas ni necesidad de cambios.

Despliegue podría tener su propia sección directamente?

Explicar que en el mismo código se encuentra documentado el proceso de setup del proyecto en un entorno local y el despliegue en producción.

Agregar que se configuró un swagger para la documentación backend para que en el futuro se puedan desarrollar nuevas apps frontend que se conecten al mismo sistema interno.



PRUEBAS

Contar sobre las 3 etapas de pruebas integrales. Comenzando por integración, contar el enfoque, qué sistemas incluyen (api, sql, blockchain) y las características del entorno donde se desarrollaron. Contar que son pruebas automatizadas que pueden ejecutarse antes de cada despliegue.

Después las pruebas de sistema, contar que fueron manuales con una lista de casos de prueba por módulo simulando el uso de usuarios reales y validando consistencia de resultados entre actores del sistema. Agregar que también se hicieron pruebas no funcionales de rendimiento del sistema, aunque se hicieron sobre un entorno local (las de carga) debido a limitaciones de tráfico en los entornos deployados gratuitos.

Finalmente, contar la experiencia de pruebas con usuarios. Contar también en esta etapa que hicimos un repaso de la UX del frontend y se hicieron mejoras en la UI y la experiencia de usuario.

En cada caso, hacer un breve resumen de cuántas pruebas se realizaron, sobre qué sistema (si aplica) y cantidad de bugs levantados y resueltos o desestimados. Contar que se cargaron en incidencias de Jira.

8

CONCLUSIONES

Resultados de la metodología, contar experiencia de ejecución real vs planeada, dar opiniones de la metodología elegida y si fue idónea para este trabajo. Contar por qué se desvió la planificación y justificar por qué igual es aceptable.

Fue un trabajo interesante, más de proceso que de resultados. Es un problema acotado, pero sumamente aplicable en el mundo real. Tuvimos contratiempos, se alargó, hubieron viajes en el medio, pero curiosamente relacionados con este trabajo y que supieron aportar perspectiva al problema. Como desafío técnico fue interesante y principalmente pude aprender mucho sobre pruebas de calidad (ya algo de experiencia tenía en planteo de requerimientos y desarrollo de software). Fue interesante la experiencia de trabajar con blockchain, probó ser una tecnología accesible y con valor real, a pesar de sus restricciones que impone al resto del software en general.

8.1. Resultados

El resultado final fue un software testeado y productivo, con una UX y UI pulida. Agregar algunas imágenes y flujos? Contar algún flujo de la aplicación, por ejemplo el de productor o reciclador.

8.2. Desafíos

Desafíos principales:

- Hacer un planteo que pueda resolver las necesidades de todos los actores

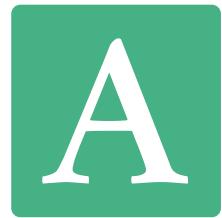
- Llevar completa la metodología de equipo siendo un equipo unipersonal.
- Implementación de la tecnología blockchain con algo de experiencia previa.
- Desarrollar el proceso completo de testeos de calidad sin experiencia previa.
- Contratiempos de viajes y trabajo y materias.
- Resolver metodología de pruebas con usuarios al ser un sistema que involucra muchos actores reales ocupados en sus asuntos.

8.3. Perspectivas Futuras

A futuro este sistema puede implementarse realmente y seguir creciendo:

- Extender soporte a cadenas de valor de otro tipo de envases: PET, aluminio.
- Implementarse como piloto en Mendoza u otras regiones
- Nuevos proyectos, como Círculs, pueden nacer inspirados por este trabajo.
- El sistema actualmente es cerrado, es decir, sigue desde principio a fin a un mismo grupo de materiales. A futuro se puede extender para comenzar o soltar la trazabilidad de elementos en cualquier paso de la cadena, para bajar la barrera de ingreso.
- Se pueden desarrollar distintas aplicaciones independientes que reemplacen a cada módulo del frontend con casos de uso a medida para cada actor.
- Se puede integrar el sistema directamente con sensores en la línea de producción de las fábricas para automatizar la carga de información sin posibilidad de error humano de carga de datos.

Apéndices



CONTENIDO ANEXO

A.1. Multimedia

Como parte de este Trabajo Final se grabó un video resumiendo los puntos más importantes del mismo y mostrando el funcionamiento de la plataforma desarrollada. El mismo se encuentra disponible en el siguiente enlace: [enlace al video]

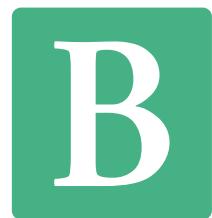
A.2. Código fuente

Todo el código del prototipo se encuentra disponible y accesible en un repositorio público de GitHub. El mismo puede ser consultado en el siguiente enlace: [enlace al repositorio]

A.3. Documentación técnica

La documentación técnica del sistema se encuentra disponible en el repositorio de GitHub mencionado anteriormente. Esta documentación incluye:

- Descripción de la arquitectura del sistema.
- Instrucciones de instalación y despliegue.
- Guía de uso de la API (Swagger).
- Detalles sobre la implementación de los smart contracts.
- Información sobre las pruebas realizadas.
- Detalles sobre la configuración del entorno de desarrollo.



TECNOLOGÍAS BLOCKCHAIN

La tecnología blockchain es en sí misma un tipo de tecnología, pero a la hora de utilizarla para un caso de uso específico no se implementa desde cero, ya que sería el equivalente a desarrollar un sistema de gestión de bases de datos desde cero para cada proyecto. En cambio, se utilizan plataformas blockchain ya desarrolladas y probadas, que ofrecen una serie de características y funcionalidades que facilitan el desarrollo y la implementación de aplicaciones descentralizadas. Cada una de estas plataformas se denomina *protocolo blockchain* y en existen múltiples protocolos blockchain disponibles y ampliamente utilizados actualmente, cada uno con sus propias características y ventajas.

En la etapa de investigación y diseño de solución de este trabajo se analizó la oferta de protocolos blockchain disponibles y se preseleccionaron cinco tecnologías blockchain líderes en la industria para su análisis y comparación. Estas tecnologías se seleccionaron en función de su relevancia, popularidad y características técnicas, y se evaluaron en función de su idoneidad para el caso de uso específico de trazabilidad en la cadena de suministro del vidrio.

Las tecnologías seleccionadas fueron: Hyperledger Fabric, Ethereum, Polkadot, VeChain y Cardano. Cada una de estas tecnologías tiene sus propias características, ventajas y desventajas, y fue importante comprender sus diferencias para seleccionar la tecnología más adecuada para este caso de uso específico.

Cada tecnología se compara en distintos aspectos clave relevantes para este trabajo. Como el tipo de tecnología, el protocolo de consenso, el lenguaje de programación, la interoperabilidad, la adopción real y el tamaño de la comunidad. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada tecnología y una comparación de sus características.

B.1. Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric es una plataforma de tecnología ledger distribuida (DLT) de código abierto y diseñada para uso en contextos empresariales¹. Hyperledger se estableció bajo la Fundación Linux y su sólida comunidad [32].

Fabric tiene una arquitectura altamente modular y configurable, que permite la innovación, la versatilidad y la optimización para una amplia gama de casos de uso de la industria, incluida la cadena de suministro. Esta es la primera plataforma de ledger distribuida que admite contratos inteligentes creados en lenguajes de programación de uso general como Java, Go y Node.js, en lugar de lenguajes específicos de dominio restringidos (DSL). Esto significa que en la mayoría de los casos no requiere capacitación adicional para aprender un nuevo idioma para desarrollo de contratos inteligentes.

La plataforma Fabric también es permisionada, lo que significa que, a diferencia de una red pública sin permiso, los participantes se conocen entre sí, en lugar de ser anónimos y, por lo tanto, no se confía en absoluto. A su vez la plataforma tiene compatibilidad con protocolos de consenso conectables que permiten que la plataforma se personalice de manera más eficaz para adaptarse a casos de uso particulares y modelos de confianza.

Fabric puede aprovechar los protocolos de consenso que no requieren una criptomoneda nativa para incentivar la minería costosa o impulsar la ejecución de contratos inteligentes. Evitar una criptomoneda reduce algunos vectores de riesgo / ataque significativos, y la ausencia de operaciones de minería criptográfica significa que la plataforma se puede implementar con aproximadamente el mismo costo operativo que cualquier otro sistema distribuido.

La combinación de estas características diferenciadoras de diseño convierte a Fabric en una de las plataformas de mejor rendimiento disponibles en la actualidad tanto en términos de procesamiento de transacciones como de latencia de confirmación de transacciones, y permite privacidad y confidencialidad de transacciones y los contratos inteligentes que los implementan.

B.2. Ethereum

Ethereum es una plataforma de código abierto basada en blockchain que permite a los desarrolladores crear y desplegar contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas (dApps)². Ethereum tiene como objetivo ser una computadora mundial descentralizada que ejecute cualquier tipo de aplicación. Esta plataforma es alimentada por su criptomoneda nativa, Ether, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red [17].

Esta plataforma fue pionera en la creación de contratos inteligentes y ha sido un líder en la

¹ <https://hyperledger-fabric.readthedocs.io/en/latest/index.html>

² <https://ethereum.org/en/learn/>

industria desde su lanzamiento en 2015. Ethereum es una plataforma de blockchain pública y sin permiso, lo que significa que cualquiera puede unirse a la red y participar en la validación de transacciones y la ejecución de contratos inteligentes.

Los contratos inteligentes en Ethereum se escriben en Solidity [33], un lenguaje de programación específico de dominio que se utiliza para definir las reglas y la lógica de una aplicación descentralizada. Los contratos inteligentes en Ethereum se ejecutan en la máquina virtual Ethereum (EVM), que es una máquina virtual Turing completa que puede ejecutar cualquier tipo de código. El lenguaje Solidity está inspirado en JavaScript y C++, lo que facilita su aprendizaje para los desarrolladores que ya están familiarizados con estos lenguajes.

Ethereum utiliza un protocolo de consenso de prueba de trabajo (PoW, Proof of Work) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena de bloques. Sin embargo, Ethereum está en proceso de migrar a un protocolo de consenso de prueba de participación (PoS, Proof of Stake).

B.3. Polkadot

Polkadot es una plataforma de blockchain de código abierto que permite la interoperabilidad entre diferentes blockchains³. Polkadot tiene como objetivo crear una red de blockchain escalable, segura e interoperable que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Esta plataforma es desarrollada por la Web3 Foundation y posee una sólida comunidad de desarrolladores activos [34].

La arquitectura de esta plataforma consta de una cadena principal ("Relay Chain") y múltiples cadenas que se conectan a ella ("parachains"). Cada parachain es una blockchain independiente, pero puede comunicarse con las demás blockchains a través de la cadena principal. Esto permite que las aplicaciones descentralizadas y los contratos inteligentes se ejecuten en diferentes blockchains y se comuniquen entre sí de manera eficiente.

Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS llamado "Nominated Proof of Stake" (NPoS) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena de bloques. La red posee una criptomoneda nativa llamada DOT, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red. Cada blockchain en Polkadot puede tener su propia criptomoneda nativa y su propio conjunto de reglas y lógica.

Las aplicaciones para Polkadot son desarrolladas utilizando Substrate⁴, un framework modular escrito en Rust que facilita la creación de blockchains personalizadas y parachains. Substrate también posee un módulo de compatibilidad con contratos inteligentes escritos en Solidity, el lenguaje de programación utilizado en Ethereum.

³ <https://polkadot.network/>

⁴ <https://docs.substrate.io/>

B.4. VeChain

VeChain es una plataforma de blockchain de código abierto dedicada a la trazabilidad y que busca asegurar la autenticidad de los productos en la cadena de suministro⁵. VeChain utiliza una combinación de tecnología blockchain, RFID e Internet de las cosas (IoT) para rastrear el movimiento de productos a lo largo de toda la cadena de suministro, desde la producción hasta el consumidor final. Esta plataforma es desarrollada por la Fundación VeChain y tiene como objetivo mejorar la transparencia y la confianza en la cadena de suministro [35].

VeChain es una plataforma permisionada, lo que significa que los participantes de la red se conocen entre sí y se confían mutuamente. Esto permite una mayor privacidad y confidencialidad de las transacciones y los contratos inteligentes que se ejecutan en la red. VeChain también utiliza una tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) para rastrear los productos a lo largo de la cadena de suministro y garantizar su autenticidad.

Esta plataforma utiliza una arquitectura de dos tokens, donde VET es la criptomoneda nativa utilizada para pagar las transacciones y los servicios de la red, y VTHO es un token secundario utilizado para pagar el costo de la ejecución de contratos inteligentes y las transacciones en la red. Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS llamado prueba de autoridad (PoA, Proof of Authority) para validar las transacciones y agregar nuevos bloques a la cadena.

Las aplicaciones para VeChain pueden desarrollarse utilizando el lenguaje de programación Solidity, el mismo utilizado en Ethereum, lo que facilita la migración de aplicaciones existentes de Ethereum a VeChain. A su vez, también se pueden desarrollar aplicaciones personalizadas utilizando el framework de desarrollo de Smart Contracts de VeChain, que proporciona una serie de herramientas y bibliotecas para facilitar el desarrollo de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes.

B.5. Cardano

Cardano es una plataforma de blockchain de código abierto que busca crear una red de blockchain escalable, segura y sostenible⁶. Cardano tiene como objetivo ser una plataforma de contratos inteligentes de tercera generación que pueda soportar una amplia gama de aplicaciones descentralizadas y contratos inteligentes. Cardano se caracteriza por su enfoque científico y riguroso en su desarrollo, utilizando evidencia formal y revisión por pares para garantizar la seguridad y confiabilidad de la plataforma [22].

Una de las características distintivas de Cardano es su enfoque en la seguridad y la provisión de garantías formales. Para programar aplicaciones en esta plataforma se utiliza el lenguaje de programación funcional Haskell, que permite la verificación formal de contratos inteligentes

⁵ <https://docs.vechain.org/introduction-to-vechain/about-the-vechain-blockchain>

⁶ <https://docs.cardano.org/about-cardano/introduction/#cardano-explained>

y protocolos. También se pueden desarrollar contratos inteligentes utilizando Plutus [36]⁷, un lenguaje de programación específico de dominio basado en Haskell que facilita la creación de contratos inteligentes seguros y confiables en Cardano.

Esta plataforma utiliza un protocolo de consenso de PoS, que es más eficiente energéticamente que los protocolos de PoW. La red posee una criptomoneda nativa llamada ADA, que se utiliza para pagar las transacciones y los servicios de la red.

B.6. Comparación

A continuación se realiza una comparación de las tecnologías blockchain mencionadas anteriormente en términos de tipo de tecnología, protocolo de consenso, lenguaje de programación, interoperabilidad, adopción real y tamaño de la comunidad.

Tecnología Hyperledger	Ethereum	Polkadot	VeChain	Cardano	
Tipo	Pública	Pública	Pública	Permisionada	Pública
Consenso	Pluggable	PoW - PoS	PoS	PoA	PoS
Lenguaje	Java, Go, Node.js	Solidity	Rust, Solidity	Solidity	Haskell
Interoperabilidad	Limitada	Limitada	Alta	Limitada	Limitada
Adopción	Alta	Muy alta	Media	Media	Media
Comunidad	Grande	Grande	Grande	Mediana	Grande

Cuadro B.1: Comparación de plataformas blockchain

B.7. Conclusión

Para este trabajo determinamos que la tecnología blockchain es la mejor opción de bases de datos para la trazabilidad en la cadena de suministro de vidrio. Esta elección se fundamenta en las características intrínsecas de la base de datos distribuida, tales como inmutabilidad, transparencia y trazabilidad, que son esenciales para mejorar la transparencia y la responsabilidad en toda la cadena de suministro. Considerando la diversidad de actores y los variados intereses en el sistema, así como la presencia de incentivos y posibles penalizaciones económicas, hay un riesgo latente de fraude y de manipulación de la información. La implementación de blockchain ofrece una solución robusta para estos desafíos, mejorando significativamente la trazabilidad y proporcionando una fuente confiable de información para todos los actores del ecosistema. En caso de inconsistencias, permite identificar rápidamente el origen del problema y facilitar las acciones correctivas.

Además, la adopción de blockchain para este problema permite la integración de contratos inteligentes, que se pueden programar para ejecutar automáticamente transacciones o verificar cumplimientos cuando se satisfacen condiciones predefinidas, por ejemplo, confirmación

⁷ <https://developers.cardano.org/docs/smart-contracts/plutus/>

de entrega de materiales, pago de incentivos y cobro de penalizaciones. Esta funcionalidad reduce la necesidad de intermediarios, disminuyendo los costos operativos y aumentando la velocidad de las transacciones. La seguridad, reforzada por una criptografía avanzada y una estructura descentralizada, garantiza que los datos registrados en la cadena no puedan ser alterados. Esto proporciona un nivel adicional de confianza y transparencia, crítico para todos los actores involucrados en la cadena de suministro del vidrio.

En base al análisis realizado es los distintos aspectos clave de cada plataforma blockchain, se elige a Ethereum como la tecnología blockchain más adecuada para el desarrollo de este trabajo por los siguientes motivos:

- Pública: Ethereum es una plataforma de blockchain pública y sin permiso, lo que permite a cualquier persona unirse a la red, leer el estado de la cadena de bloques y participar en la validación de transacciones.
- PoS: en su última actualización, Ethereum está migrando a un protocolo de consenso de prueba de participación, que es más eficiente energéticamente que el protocolo de PoW, por lo que es más sostenible a largo plazo y reduce el impacto ambiental del uso de la aplicación.
- Comunidad: entre las opciones revisadas, Ethereum posee la mayor comunidad de desarrolladores activos y adopción en la industria, lo que garantiza un soporte continuo y una amplia gama de recursos disponibles durante el desarrollo y mantenimiento de la aplicación.
- Lenguaje de programación: Ethereum utiliza el lenguaje de programación Solidity para desarrollar contratos inteligentes y aplicaciones descentralizadas. Este lenguaje de alto nivel es fácil de aprender y permite a los desarrolladores crear aplicaciones complejas de manera eficiente.
- Interoperabilidad: Ethereum es compatible con una amplia gama de aplicaciones y protocolos, lo que facilita la interoperabilidad con otras plataformas de blockchain y aplicaciones descentralizadas. De entre las opciones revisadas, Ethereum es la plataforma más compatible y versátil para integrar con otras tecnologías y sistemas y posee una amplia gama de herramientas y bibliotecas disponibles para facilitar la integración.



MATERIALES RECICLABLES

En el marco del desarrollo sostenible, la selección del tipo de residuo a manejar en proyectos de economía circular es crucial. Esta decisión no solo afecta la viabilidad del proyecto [7] sino también su impacto ambiental y social. En la etapa de definición de alcance previo a comenzar el desarrollo de este trabajo se investigaron diferentes tipos de residuos, destacando sus ventajas y desventajas, para determinar cuál podría ser más apropiado para centrar los esfuerzos de recuperación y reciclaje en este caso. C.1

C.0.1. Residuos Orgánicos

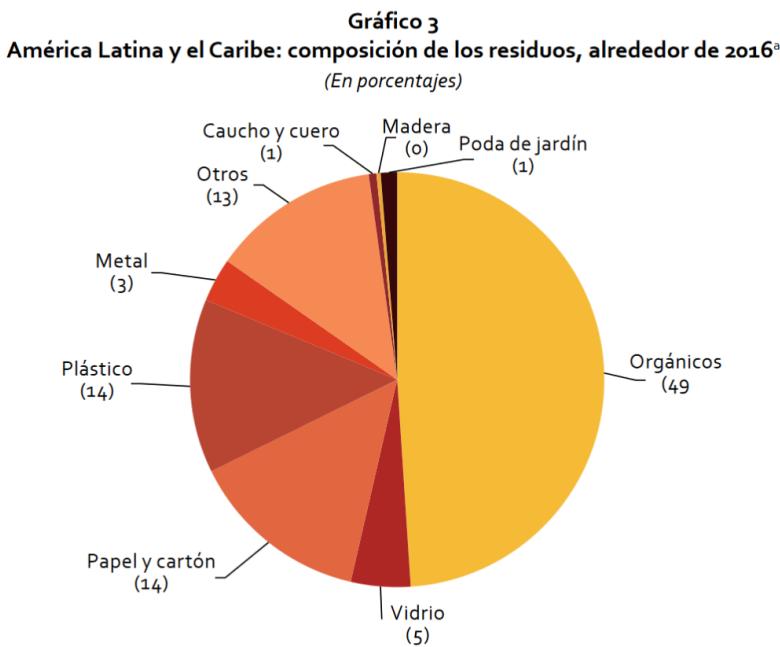
Los residuos orgánicos, como desechos de alimentos y residuos de jardinería, presentan oportunidades significativas para el compostaje y la producción de biogás. Sin embargo, su descomposición produce metano, un potente gas de efecto invernadero, si no se gestiona adecuadamente.

C.0.2. Residuos Electrónicos

Los residuos electrónicos contienen metales preciosos y ofrecen oportunidades económicas significativas. No obstante, su reciclaje presenta desafíos debido a la presencia de sustancias tóxicas, lo que requiere procesos de reciclaje especializados y costosos.

C.0.3. Papel y Cartón

El papel y el cartón son materiales reciclables y biodegradables, lo que los convierte en una opción sostenible. Sin embargo, la calidad del papel reciclado puede ser inferior a la del papel



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Banco Mundial, "What a Waste Global Database", 2021 [en línea] <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/what-waste-global-database>.

^a Datos de 30 países. Los años reportados en la base de datos son variables.

Figura C.1: Composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina. Fuente: CEPAL, 2021.

virgen, lo que limita su reutilización en ciertas aplicaciones.

C.0.4. Plásticos

El reciclaje de plásticos puede reducir la dependencia de los recursos fósiles y disminuir la contaminación. Sin embargo, la variedad de tipos de plástico y la contaminación cruzada pueden complicar los procesos de reciclaje, haciéndolos menos eficientes.

C.0.5. Textiles

El reciclaje de textiles apoya la sostenibilidad en la industria de la moda. A pesar de esto, la rápida moda contribuye a altas tasas de desechos textiles, y muchos de estos no son reciclables debido a mezclas de materiales y tratamientos químicos.

C.0.6. Metales

Los metales son altamente reciclables y su recuperación es eficiente en términos de energía. La principal desventaja es la posible degradación de la calidad con ciertos metales no ferrosos, lo que puede limitar su reutilización.

C.0.7. Vidrio

El vidrio es completamente reciclabl e y puede ser procesado infinitas veces sin pérdida de pureza o calidad. Sin embargo, la recolección y el transporte del vidrio deben manejarse con cuidado para evitar la contaminación y garantizar la viabilidad del reciclado.

Para ser reciclado, el vidrio debe ser separado por color y tipo, lo que puede ser un desafío en la gestión de residuos. Sin embargo, el vidrio reciclado tiene un alto valor en el mercado y puede ser utilizado para fabricar nuevos envases a menor costo.

C.0.8. Residuos de Construcción y Demolición

Estos residuos ofrecen un gran potencial de reutilización y reciclaje. El principal reto es la separación efectiva de los materiales en el sitio de demolición, lo cual es esencial para su posterior procesamiento.

C.0.9. Decisión Final

Para el alcance de este proyecto, se considerará entre plástico y vidrio debido a su relevancia (14 % y 5 % de la composición de residuos sólidos urbanos en América Latina, respectivamente) y potencial para la implementación de prácticas de economía circular. Se descarta la opción de residuos orgánicos debido a su alta generación de metano y la de residuos electrónicos por su complejidad en el reciclaje. Se descartan también textiles, metales y residuos de la construcción por su menor presencia en la composición de residuos sólidos urbanos en la región. Se descarta papel y cartón por su menor potencial de innovación en comparación con plástico y vidrio. Se realizará un análisis más profundo de estos dos materiales para determinar cuál de ellos ofrece mayores beneficios y posibilidades de implementación efectiva en el contexto local.

C.1. Comparación entre Vidrio y Plástico

Para una adecuada selección de materiales en proyectos de economía circular, es crucial comprender las diferencias entre los tipos de residuos más comunes. A continuación se presenta una comparación detallada entre vidrio y plástico basada en varios criterios importantes para su gestión y reciclaje.

Como se puede observar en la tabla C.1, el vidrio y el plástico presentan diferencias significativas en términos de cantidad generada, variedad, usos, y complejidad en su reciclaje. Mientras que el vidrio tiene una tasa de reciclaje relativamente alta y un impacto ambiental menor debido a su capacidad de ser reciclado múltiples veces sin pérdida de calidad, el plástico, aunque más versátil y utilizado en una variedad más amplia de productos, enfrenta desafíos significativos debido a su alta variedad y la degradación de calidad con cada ciclo de reciclado.

Criterio	Vidrio	Plástico
Cantidad generada	5 %	14 %
Variedad de tipos	Baja	Alta
Usos comunes	Envases, ventanas, vajillas	Envases, muebles, electrónica
Complejidad de reciclaje	Baja	Alta
Impacto ambiental	Menor	Mayor
Tasa de reciclaje	Alta	Variable, generalmente baja
Degradación por reciclado	No degrada	Degradación de calidad
Requerimientos de tratamiento	Fundición a alta temperatura	Diversos métodos según tipo
Potencial de mercado para reciclados	Estable	Creciente pero complejo

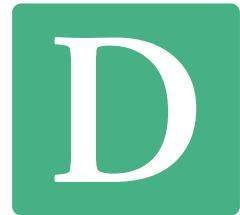
Cuadro C.1: Comparación entre vidrio y plástico en el contexto de economía circular.

Además, el impacto ambiental del plástico es considerablemente mayor, especialmente por su contribución a la contaminación marina y la dificultad de descomposición.

Debido a estas características, dentro del alcance de este trabajo se elige el vidrio como el material principal para la implementación de prácticas de economía circular en el contexto local. A pesar de su menor presencia en los residuos sólidos urbanos, el vidrio ofrece ventajas significativas en términos de reciclaje, impacto ambiental y viabilidad de mercado para los reciclados.

El reciclaje del vidrio es especialmente relevante en la región de Mendoza, donde la industria vitivinícola es un pilar económico fundamental y el vidrio desempeña un papel crucial en la cadena de suministro de este sector. En esta región opera Verallia Argentina, una de las principales productoras de envases de vidrio del país. Esta empresa, siendo un actor esencial en la cadena de suministro del vidrio, juega un rol significativo en la promoción de la sostenibilidad dentro de la industria vitivinícola y en la economía regional. Actualmente, Verallia implementa prácticas de reciclaje de vidrio, proporcionando una base sólida para la adopción de tecnologías avanzadas y la mejora de los procesos de trazabilidad y gestión de residuos [37]. A lo largo de este estudio, se explorará en profundidad cómo la cadena de suministro del vidrio en Verallia puede integrarse más efectivamente en la economía circular y cómo las innovaciones en el reciclaje de vidrio pueden maximizar su impacto ambiental y económico.

A lo largo de este trabajo se realizará un análisis más detallado de la cadena de suministro del vidrio y las oportunidades de innovación en el reciclaje de vidrio para maximizar su potencial en la economía circular.



ENTREVISTA A VERALLIA

Durante la etapa de investigación y recopilación de información para el desarrollo de este trabajo, luego de definir el alcance, se llevó a cabo una entrevista con una representante de Verallia, la principal empresa fabricante y manufacturadora de la fabricación de envases de vidrio en Mendoza, principal proveedora de la industria vitivinícola local.

La entrevista se realizó con Lucía, quien es parte del equipo de sostenibilidad de Verallia Argentina en Mendoza. Previo a la entrevista fue informada sobre el contexto de este trabajo y la finalidad de la entrevista y dio consentimiento para que la información compartida fuera incluida en este trabajo.

La conversación se centró en conocer los procesos actuales de producción y reciclaje de vidrio en Verallia, las iniciativas sostenibles que la empresa está implementando y las oportunidades para mejorar la trazabilidad y la gestión de residuos en la cadena de suministro de la empresa.

La entrevista fue realizada por teléfono, tuvo una duración aproximada de 45 minutos y fue grabada. La modalidad de la entrevista fue semiestructurada, permitiendo una conversación fluida y la posibilidad de profundizar en temas relevantes a medida que surgían. Previo a la entrevista, se preparó una lista de preguntas que abarcaban los siguientes temas:

A continuación se presenta un resumen de las preguntas realizadas y las respuestas obtenidas:

Preguntas: - Contame cómo es el proceso que hacen ustedes - El vidrio reciclado de dónde sale - Qué hacen cuando les llega el vidrio, viene clasificado o lo clasifican ustedes? - Cómo se involucran sus clientes - Hay alguna reglamentación o restricción para poder reciclar? - Les serviría que el vidrio llegara en cantidad y preclasificado? - Qué les interesaría de un sistema como este? Qué le serviría a tu empresa? Qué tanto les serviría un sistema de trazabilidad?

Crean que sería factible incorporar un sistema de estas características? - Cuánto vuelve en relación a lo que venden? - Sabés si alguno de tus clientes tienen algún programa particular o compromiso con lo sustentable.

Respuestas: Recolectores urbanos recogen vidrio. No hay cultura de reciclado en Arg. En el camion va junto y en la planta lo separan. En otros paises hasta el usuario separa. No hay una politica gral en Mza, es por cada municipio. A ellos les vende el vidrio los recolectores en negro. Necesitan que sean en blanco. Tienen 2 empresas que cuando compran el vidrio lo limpian. La limpieza es manual y cara. Tienen su nueva propia planta de limpieza. No se puede reciclar vidrios de distintos colores juntos. V reciclan botellas y frascos. El vidrio limpio va directo a la linea de producción.

V accion transparente es puertas afuera y Lucia es puertas adentro. Hay 32 campanas de la acción transparente. El muni retira y ellos compran y reciben. Campañas de entradas al cine. 3 o 4 eventos al año. También fomentan que los empleados reciclen. Concientizar y fomentar el reciclado. Las campañas dan un aporte mínimo de vidrio. No acompañan las políticas. Mucho viene de recicladores y pymes. Bodegas a veces traen poco y las campañas traen poco. Sale más barato la materia prima que comprar y limpiar vidrio para reciclaje. Intermediarios por los que están en negro. Tienen que clasificar ellos. A veces descartan mucho por los altos niveles de plomo. La planta de limpieza clasifica. Separan por color y por no sé qué más. Mati de reciclaje. Separan tapas etiquetas basura. No saben de dónde vienen. Competencia Katorini? Hay suficiente oferta Cuál es la legislación para comprar vidrio? Es interna o internacional? Podría venir de greenly la entrega (centralizamos a los recicladores). Estilo punto verde.

Los clientes suyos querrían sumarse a una campaña? A ustedes les serviría? Vendría ya clasificado. Podrían hacerse convenios.

Cuánto fue el objetivo este año? Menor al del año pasado.

- Les serviría un sistema de trazabilidad? - La empresa podría participar localmente de un experimento o no se puede? Sí - Les ponen marcadores impresos a las botellas? Eso puede servir para después reciclar y pagás mejor tu vidrio. - Qué nivel d trazabilidad tienen los envases? Tienen numero de molde y la marca abajo - La limpieza siempre es necesaria antes re-usarse el calcín



VIAJE DE INVESTIGACIÓN

En el mes de noviembre de 2024, durante la etapa de definición del alcance de este trabajo, oportunamente (por motivos profesionales ajenos a este trabajo) se realizó un viaje de investigación a Europa para conocer de primera mano los sistemas de reciclaje y economía circular implementados en diferentes países. Los resultados de esta experiencia resultaron ser enriquecedores para este trabajo de tesis, a pesar de haber generado un retraso en su planificación.

Este viaje tuvo como objetivo principal aprender sobre las mejores prácticas en la gestión de residuos y el reciclaje, así como explorar la viabilidad de implementar un sistema similar en ciudades de latinoamérica. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes de la experiencia:

- Se visitaron 3 ciudades: Madrid (España), Amsterdam (Países Bajos) y Berlín (Alemania), cada una con sus propios sistemas de reciclaje y gestión de residuos.
- En Madrid, no tienen DRS, se observó la mecánica de recolección diferenciada y las categorías de recolección en origen. Se concluyó que entre los países visitados, España es el que menos ha avanzado en la implementación de sistemas de reciclaje y economía circular. A su vez, cabe destacar que la sustentabilidad y economía circular sí es un tema de interés y preocupación en la sociedad española, pero aún no se han implementado sistemas de recolección diferenciada ni DRS. España ha implementado la Ley REP hace algunos años y en 2025 se comenzó el plan para la implementación de DRS debido a que no alcanzaron sus metas de reciclaje de los últimos años.
- En Amsterdam se usa el sistema DRS, donde los consumidores pagan un depósito por las botellas de vidrio y plástico y latas, que se les devuelve al devolverlas en una RVM, ubicadas en las principales cadenas de supermercados. Con esta técnica se fomenta el hábito de reciclaje de envases en los ciudadanos, al incluirlo como un paso extra al proceso de ir de compras al

supermercado. Este sistema ha demostrado ser efectivo para aumentar las tasas de reciclaje y reducir la cantidad de residuos. El problema hallado es que en la ciudad, los tachos de basura son vandalizados por recolectores informales para buscar botellas y latas (quienes usan el dinero obtenido para poder comprar comida diariamente), lo que genera un problema de higiene. Tuvimos la oportunidad de visitar un centro verde, y descubrimos que en esta ciudad las altas tasas de recuperación y reciclaje no se reduce a los envases, sino que también se aplica a otros tipos de residuos como papel, cartón, metales, electrodomésticos y muebles. En este centro verde se reciben los residuos reciclables y se clasifican para su posterior reciclaje. Es lo normal para los ciudadanos dirigirse a estos centros para entregar sus residuos o muebles y electrodomésticos en desuso. Respecto a la recolección diferenciada, se observó que los ciudadanos separan sus residuos en diferentes contenedores ubicados en la vía pública, y la recolección se realiza de manera semanal, de a un material por vez. Cada material se recoge una vez por semana. Los vecinos reclaman que la frecuencia de recolección es insuficiente, ya que los tachos se llenan rápidamente y no hay espacio para más residuos, que quedan expuestos en la vía pública junto a los contenedores. Es notorio que los ciudadanos contemplan el reciclaje como parte de su rutina diaria, y la separación de residuos es una práctica común. Además, se observó que los ciudadanos están muy concientizados sobre la importancia del reciclaje y la reducción de residuos. A su vez, se intentó indagar con el destino final de los residuos reciclables, y se nos informó que la mayoría de los materiales reciclables son procesados en el país, pero que son exportados a otros países fuera de europa para su disposición final y se desconoce el destino final de los mismos o si realmente son reciclados.

- En Alemania

En orden de evolución Contar la experiencia de investigación de sistemas de reciclaje en Europa. Contar sobre los DRS y los centros de reciclaje. Adjuntar fotos. Contar cada paso a paso qué cosas hicimos y a qué lugares fuimos. Hacer minuta.



METODOLOGÍAS DE DESARROLLO DE SOFTWARE

En el ámbito del desarrollo de software, la selección de una metodología de trabajo adecuada es un factor determinante para garantizar la eficacia y el éxito de un proyecto. La planificación y ejecución de este trabajo de tesis depende en gran medida de la estructura metodológica que se elija. La selección de una metodología es necesaria considerando que las metodologías no son soluciones universales, sino herramientas que deben ajustarse a las necesidades específicas de cada proyecto, tomando en cuenta aspectos como los objetivos, el alcance, el equipo involucrado y la forma de entrega de los resultados.

El objetivo principal de esta sección es realizar un análisis detallado de las principales metodologías de desarrollo de software conocidas, evaluando sus características y su aplicabilidad en función de los requerimientos y condiciones particulares del trabajo de tesis. Para ello, se han considerado tanto metodologías tradicionales como ágiles, cada una con enfoques y principios diferentes, pero con un mismo fin: facilitar el desarrollo de un software funcional que cumpla con los objetivos planteados en este proyecto.

A lo largo de este análisis, se compararán metodologías clave en función de varios criterios, como la definición de requerimientos, la planificación de actividades, y la flexibilidad frente a cambios. Este enfoque permitirá identificar la metodología más adecuada que permita no solo el cumplimiento de los plazos y los objetivos técnicos, sino también una integración fluida de los distintos aspectos del desarrollo y la entrega final del software.

Con el objetivo de elegir la metodología de trabajo más adecuada para el desarrollo de software de este trabajo de tesis, se analizaron varias metodologías distintas teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Objetivos del trabajo de tesis
- Planificación de actividades
- Alcance del prototipo
- Definición de requerimientos funcionales y no funcionales
- Modalidad de entrega de resultados
- Equipo de trabajo

Se analizaron diferentes metodologías de trabajo para el desarrollo de software, incluyendo metodologías de trabajo tradicionales y metodologías ágiles para determinar cuál se ajusta mejor a este proyecto. Tras la revisión general de metodologías existentes, comparamos en distintos aspectos claves con profundidad un grupo selecto de 5 metodologías que consideramos más adecuadas para el desarrollo de software de este trabajo de tesis tras el análisis previo.

F.1. Metodologías de desarrollo de software

Las metodologías de desarrollo de software pueden clasificarse en dos grandes categorías: prescriptivas y evolutivas. Los modelos prescriptivos o tradicionales, ofrecen una estructura y un orden definidos, orientados a maximizar la previsibilidad y la eficiencia en entornos bien entendidos y con pocos cambios. Estos modelos tradicionales introdujeron disciplina en la práctica de la ingeniería de software, aunque su rigidez puede ser una limitante en proyectos donde los requerimientos son inciertos o susceptibles a cambios frecuentes.

Por otro lado, los modelos de proceso evolutivo y el desarrollo ágil se adaptan mejor a las realidades dinámicas del desarrollo de software moderno. Permiten una iteración continua y la adaptación frente a los cambiantes requerimientos del negocio y la tecnología. El desarrollo ágil, en particular, pone énfasis en la flexibilidad, la colaboración continua con el cliente y la capacidad de responder a cambios con rapidez y eficacia. Los enfoques ágiles son valorados por su capacidad de facilitar la entrega rápida de software funcional y adaptarse a las necesidades cambiantes del proyecto y del mercado.

Existen montones de metodologías de desarrollo de software, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Para elegir la metodología adecuada para este trabajo, se filtraron y preseleccionaron 5 metodologías de desarrollo de software que se consideraron más adecuadas para el desarrollo de software de este trabajo de tesis. Estas metodologías son:

- Modelo en cascada
- Modelo en V
- Modelo espiral
- Metodología Scrum
- Metodología Kanban

A continuación, se presenta una descripción y un análisis de cada una de estas metodologías,

evaluando sus características, ventajas y desventajas, y su aplicabilidad en función de los requerimientos y condiciones particulares del trabajo de tesis.

F.1.1. Modelo en cascada

La metodología en cascada es uno de los enfoques más antiguos y estructurados en el desarrollo de software. Este modelo es secuencial y lineal, lo cual implica que las fases del proyecto deben completarse en un orden específico sin posibilidad de retorno una vez finalizadas. Estas fases incluyen la especificación de requerimientos, planeación, modelado, implementación, despliegue y mantenimiento. Cada una de estas etapas debe ser completada satisfactoriamente antes de avanzar a la siguiente, garantizando así una planificación clara y una estructura bien definida [31].

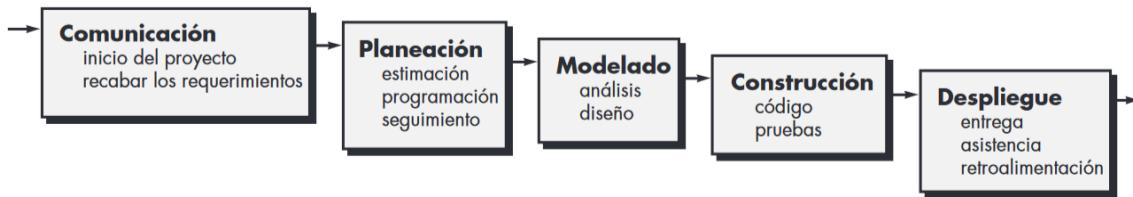


Figura F.1: Modelo en cascada. Fuente: [31]

Este modelo es ideal para proyectos donde los requerimientos son bien conocidos y estables desde el inicio, como en las adaptaciones a sistemas existentes que requieren modificaciones específicas por cambios regulatorios. Sin embargo, este modelo ha sido criticado por su rigidez y por la dificultad que presenta ante la necesidad de adaptarse a cambios durante el desarrollo del software. Problemas como la dificultad de los clientes para expresar todos los requerimientos inicialmente y los riesgos de descubrir errores tardíamente en el proceso son inherentes al modelo en cascada. Estos desafíos pueden llevar a lo que se conoce como "estados de bloqueo", donde la dependencia entre tareas secuenciales causa inactividad y retrasos significativos.

F.1.2. Modelo en V

El modelo en V es una variante del modelo de cascada que añade un enfoque sistemático en la verificación y validación de cada etapa del desarrollo del software [31]. Este modelo sigue un enfoque secuencial, de forma similar al modelo en cascada, sin embargo, se diferencia en que cada fase de desarrollo está emparejada con una fase de prueba correspondiente, formando una estructura en forma de "V". A medida que el proyecto avanza hacia abajo en la primera mitad de la V, los requisitos y componentes del sistema son detallados cada vez más. Una vez completada la codificación, el proceso asciende por el lado derecho de la V, donde cada etapa de desarrollo anterior es validada a través de pruebas detalladas.

Esta metodología es útil para asegurar que cada componente del software sea validado en pa-

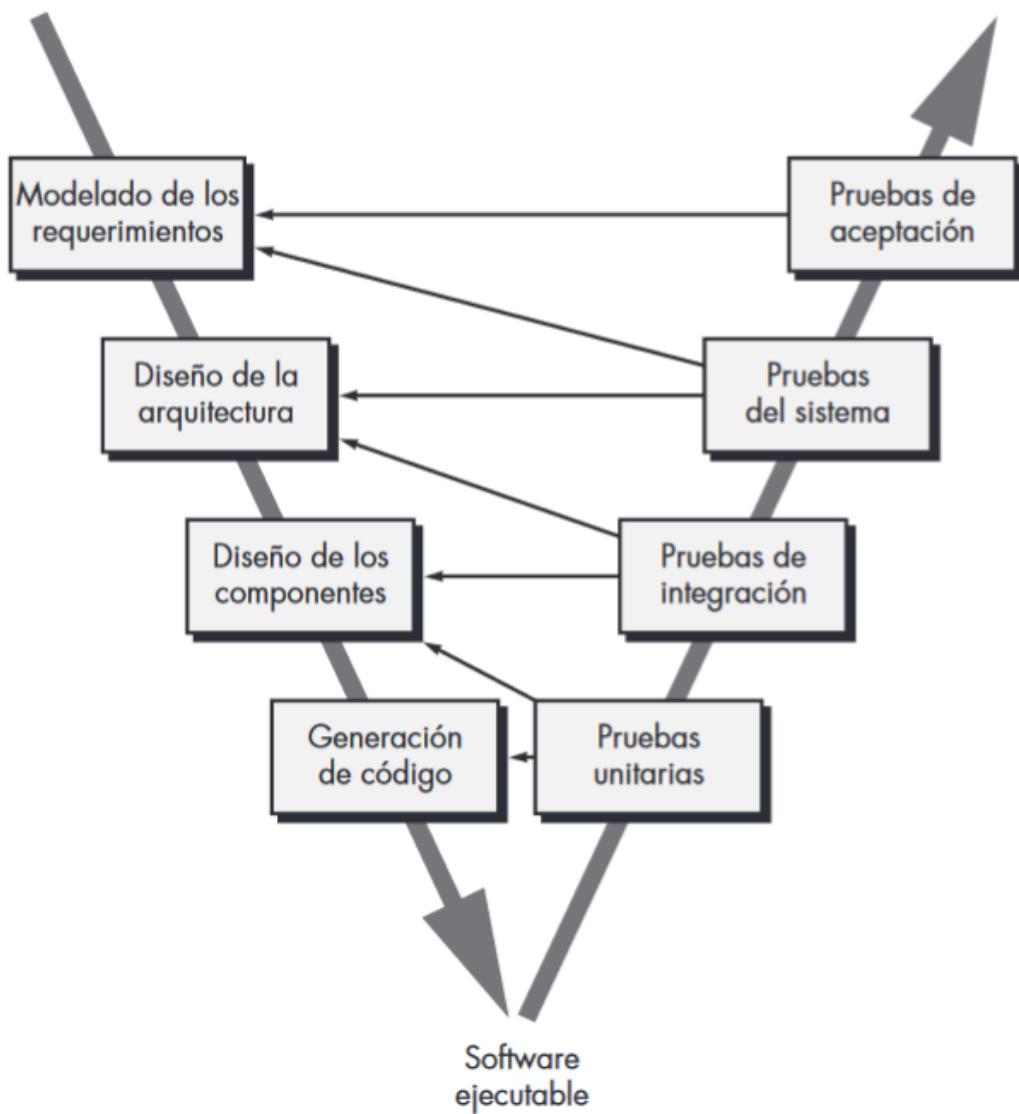


Figura F.2: Modelo en V. Fuente: [31]

ralelo a su creación, permitiendo la detección y corrección temprana de errores. Este enfoque ayuda a minimizar los riesgos al final del proyecto, haciendo del modelo en V una opción fuerte para proyectos que requieren altos estándares de calidad y donde los errores tempranos podrían tener consecuencias costosas o críticas. Aunque este modelo comparte algunas limitaciones con el modelo en cascada, como la dificultad para adaptarse a cambios significativos una vez que el proyecto está en curso, su estructura permite una mejor gestión del riesgo y calidad mediante la validación constante de cada etapa del desarrollo.

F.1.3. Modelo espiral

El modelo espiral es un enfoque evolutivo que combina la iteración de los prototipos con la rigurosidad sistemática del modelo en cascada [31]. Este modelo se distingue por su enfoque

cíclico que permite el crecimiento incremental de la definición de un sistema mientras se reduce su grado de riesgo. Se caracteriza por su flexibilidad en el manejo de los riesgos y la capacidad de adaptarse continuamente a las necesidades cambiantes del proyecto a través de iteraciones sucesivas.

En el modelo espiral, el desarrollo se organiza en una serie de espirales o ciclos, cada uno de los cuales representa una fase del proyecto. Cada ciclo incluye la planificación, la identificación de riesgos, el desarrollo y la evaluación del prototipo o secciones del software, y la planificación de la siguiente iteración. Los prototipos iniciales suelen ser simples y evolucionan para convertirse en versiones cada vez más completas y complejas del software, a medida que se profundiza en el ciclo espiral.

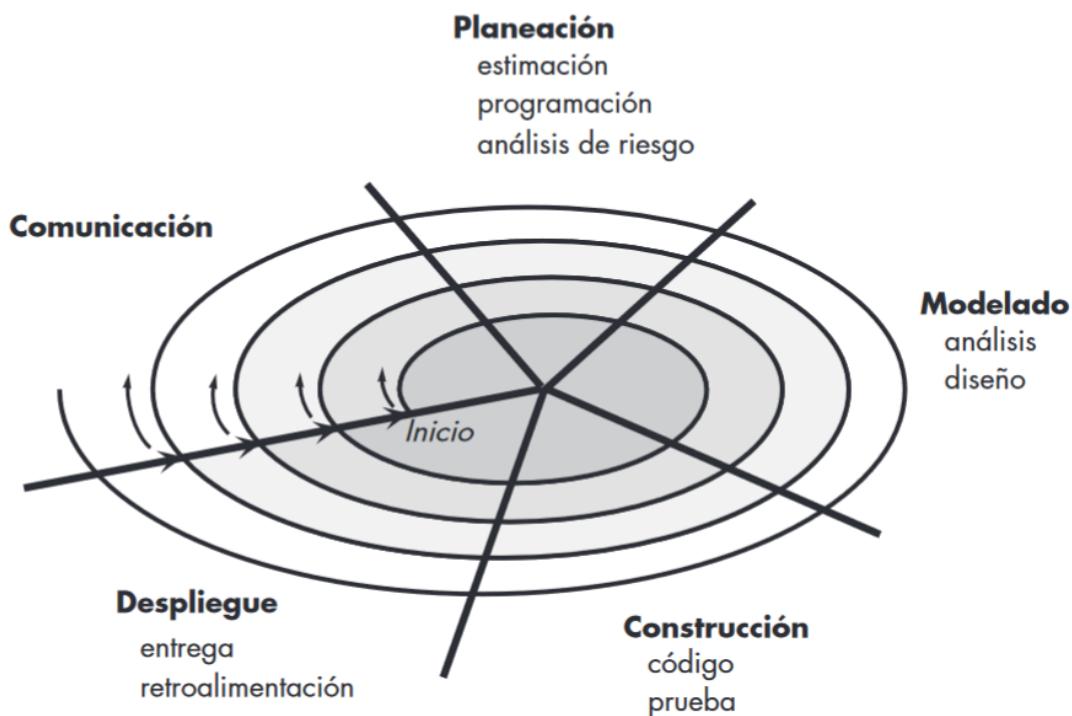


Figura F.3: Modelo espiral. Fuente: [31]

Una característica clave del modelo espiral es su enfoque en la gestión de riesgos en cada ciclo. En cada paso del proceso, se realiza una evaluación de riesgos, lo que permite identificar y mitigar problemas potenciales antes de que se conviertan en obstáculos significativos. Este enfoque iterativo permite a los desarrolladores y clientes entender mejor y reaccionar a los riesgos en cada nivel de evolución del proyecto. Esta capacidad para adaptarse y evolucionar con el tiempo lo hace particularmente útil en entornos dinámicos y en constante cambio.

El desafío de este modelo radica en que requiere una evaluación continua y experta de los riesgos, y puede ser difícil convencer a los clientes, especialmente en situaciones contractuales, de que el enfoque iterativo y evolutivo es controlable y efectivo. Además, la complejidad en la gestión del proyecto puede aumentar debido a la necesidad de revisiones y ajustes continuos

en cada ciclo.

F.1.4. Metodología Scrum

Scrum es una metodología ágil de desarrollo de software que se alinea con los principios del Manifiesto Ágil, promoviendo flexibilidad, colaboración continua, y adaptabilidad a los cambios. Este modelo estructura el desarrollo en ciclos cortos y repetitivos llamados sprints, típicamente de 2 semanas, donde no se permiten cambios durante el sprint, proporcionando estabilidad mientras se abordan los requisitos seleccionados del backlog, una lista dinámica y priorizada de tareas del proyecto que puede modificarse en cualquier momento [31].

El proceso de Scrum incluye reuniones diarias breves donde cada miembro del equipo responde a tres preguntas fundamentales sobre sus avances, obstáculos, y planes, lo que ayuda a identificar y resolver problemas rápidamente, fomentando la autoorganización y eficiencia del equipo. Al final de cada sprint, se realiza una demostración al cliente del incremento de software desarrollado, facilitando la retroalimentación vital que influirá en los siguientes sprints y asegurando que el producto final cumpla con las expectativas del cliente.

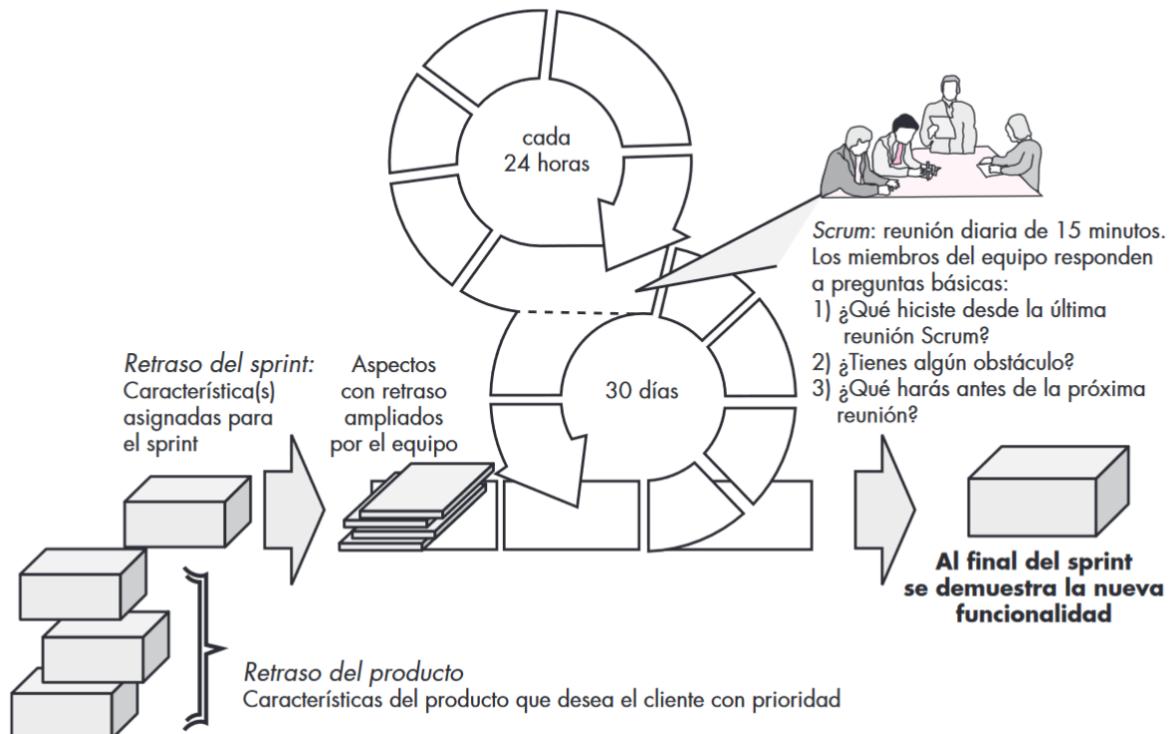


Figura F.4: Metodología Scrum. Fuente: [31]

Scrum es efectivo en entornos donde la incertidumbre es la norma, aceptando el caos como una parte inherente del desarrollo de software y ofreciendo herramientas para gestionarlo de manera efectiva. La iteración continua, evaluación constante de riesgos, y la involucración directa del cliente permiten dirigir proyectos hacia resultados exitosos, incluso en circunstancias

desafiantes, haciendo de Scrum una metodología ideal para proyectos que exigen flexibilidad y colaboración estrecha con el cliente.

F.1.5. Metodología Kanban

El método Kanban es un enfoque visual para la gestión del flujo de trabajo. Este método busca optimizar la eficiencia al evitar la sobrecarga de trabajo, eliminando cuellos de botella y desperdicios, y reduciendo los tiempos de espera, lo que a su vez incrementa el rendimiento de los procesos [38].

Kanban se centra en la utilización de un sistema de "pull"(extracción), donde el trabajo solo se inicia cuando hay capacidad disponible, lo que permite una mayor adaptabilidad y respuesta a los cambios en las prioridades del proyecto. Este enfoque se visualiza mediante el tablero Kanban, dividido en columnas que representan diferentes etapas del proceso de desarrollo. Cada tarea o 'tarjeta' se mueve de izquierda a derecha a través del tablero, reflejando su progreso desde el inicio hasta la finalización. Las columnas básicas de un tablero Kanban incluyen "Por hacer", "En progreso", "Completado", aunque el tablero puede personalizarse agregando columnas adicionales según las necesidades del proyecto.

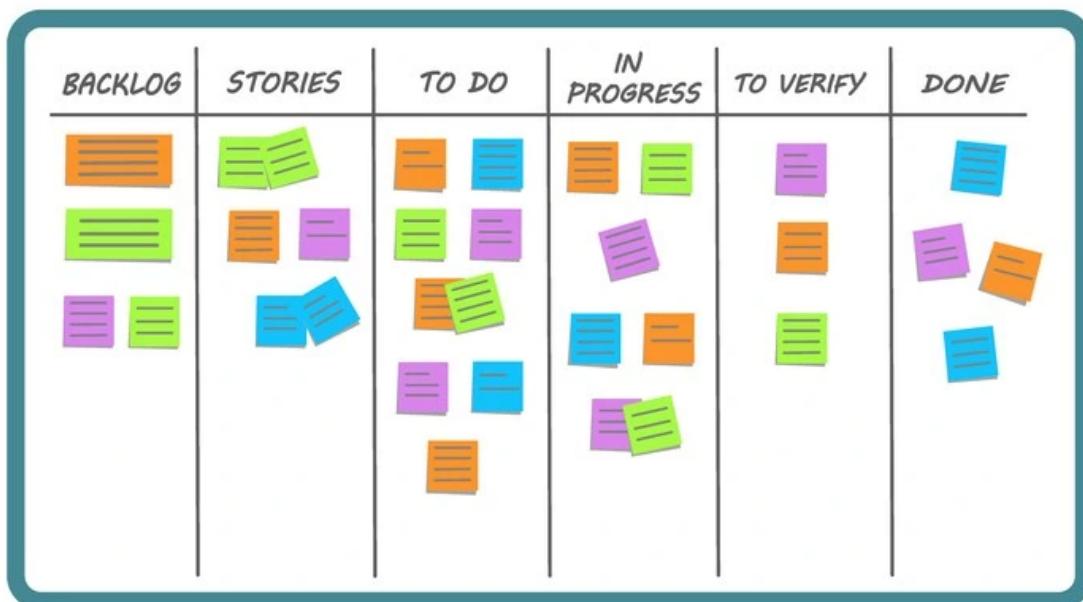


Figura F.5: Tablero Kanban de ejemplo.

Este método define cinco principios claves para la práctica: limitar el trabajo en progreso, visualizar el flujo de trabajo, medir y gestionar el flujo, hacer explícitas las políticas del proceso, y utilizar modelos para reconocer oportunidades de mejora. Estos principios ayudan a mantener el enfoque en la eficiencia del flujo de trabajo y en la mejora continua, permitiendo al equipo adaptar sus prácticas y procesos según las necesidades del proyecto y las condiciones

del entorno.

Kanban no requiere cambios estructurales grandes para su implementación y se adapta a la situación actual de cualquier organización. Una posible desventaja es que Kanban requiere una disciplina rigurosa y una comunicación constante dentro del equipo para mantener la precisión del flujo visualizado en el tablero y que se corresponda con la realidad, lo que puede ser desafiante en equipos grandes. Además, la falta de fases definidas y la ausencia de revisiones sistemáticas del progreso pueden dificultar la gestión de proyectos a gran escala, donde se requiere una coordinación extensa entre múltiples equipos o disciplinas. A su vez, Kanban puede no ser adecuado para proyectos que enfrentan cambios frecuentes y radicales en los requerimientos, ya que está diseñado para optimizar flujos de trabajo existentes más que para adaptarse a innovaciones constantes.

F.2. Comparación de metodologías

A continuación, se presenta a modo de resumen una comparación de las metodologías de desarrollo de software analizadas en distintos aspectos clave para determinar cuál es la más adecuada para el desarrollo de software de este trabajo de tesis.

F.3. Ágil (Scrum)

- **Naturaleza del Proyecto:** Ideal para proyectos con requisitos cambiantes y evolución constante.
- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden cambiar en cada sprint, permitiendo interacción continua con el cliente.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos pequeños (idealmente 5-9 personas), colaborativos y multidisciplinarios.
- **Cultura Organizacional:** Cultura colaborativa, centrada en la mejora continua y la auto-organización.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad para adaptarse a los cambios durante cada sprint (iteración).
- **Documentación:** Documentación mínima, suficiente para facilitar la entrega de valor funcional.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Los riesgos se manejan en cada sprint, con pruebas y ajustes continuos.
- **Entregas al Cliente:** Entregas frecuentes (cada sprint), con incrementos de software funcional.
- **Curva de Aprendizaje:** Media. Requiere adaptación a la metodología y roles dentro del equipo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Alta. Las iteraciones cortas permiten entregas rápidas y ajustes

según la retroalimentación.

- **Manejo de Cambios:** Cambios fáciles de gestionar en cada sprint.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgos gestionados en cada sprint, con retrospectivas que permiten mejoras continuas.

F.4. Ágil (Kanban)

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos que requieren flujo continuo y flexibilidad para gestionar tareas.
- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden ajustarse de manera continua según la demanda y prioridades.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos pequeños a medianos, más flexibles en tamaño, ajustando tareas según el flujo de trabajo.
- **Cultura Organizacional:** Cultura flexible y adaptable, con enfoque en la optimización del flujo de trabajo.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad en la gestión del flujo, ajustando la carga de trabajo en función de prioridades.
- **Documentación:** Documentación mínima, enfocada en la visualización del flujo y el progreso.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Control continuo del flujo de trabajo, evitando cuellos de botella.
- **Entregas al Cliente:** Entregas continuas, en función de la finalización de tareas o según demanda.
- **Curva de Aprendizaje:** Baja. Fácil de implementar, basado en la mejora continua del flujo de trabajo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Alta. Flujo continuo de desarrollo, ajustando la velocidad según prioridades.
- **Manejo de Cambios:** Los cambios se gestionan en función de la demanda, ajustando tareas en el flujo de trabajo.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgos manejados de manera continua, ajustando el flujo y reduciendo cuellos de botella.

F.5. Cascada

- **Naturaleza del Proyecto:** Adecuado para proyectos con requisitos claros y definidos desde el principio.
- **Requisitos del Cliente:** Requisitos fijos desde el inicio, cualquier cambio implica un costo significativo.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, con roles bien definidos y fases claras.
- **Cultura Organizacional:** Cultura jerárquica y estructurada, con fases bien definidas.

- **Flexibilidad en Gestión:** Baja flexibilidad, difícil de cambiar una vez iniciado el proyecto.
- **Documentación:** Documentación detallada en cada fase del ciclo de vida del desarrollo.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo alto si los requisitos cambian, control de calidad al final del ciclo.
- **Entregas al Cliente:** Una única entrega al final del proyecto.
- **Curva de Aprendizaje:** Baja. Fácil de comprender, pero difícil de ajustar a cambios durante el ciclo.
- **Velocidad de Desarrollo:** Baja a media. El ciclo es largo debido a la rigidez en las fases.
- **Manejo de Cambios:** Cambios difíciles y costosos de implementar una vez que el proyecto ha avanzado.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo alto, ya que los problemas suelen descubrirse al final, durante la fase de prueba.

F.6. Modelo en V

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos de alta criticidad, con un enfoque riguroso en calidad y validación.
- **Requisitos del Cliente:** Requisitos claros desde el inicio, con verificación constante.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, con roles especializados para cada fase.
- **Cultura Organizacional:** Cultura disciplinada y centrada en la calidad, con un fuerte enfoque en la validación y verificación.
- **Flexibilidad en Gestión:** Flexibilidad moderada, cambios difíciles una vez avanzado el proyecto.
- **Documentación:** Documentación extensa, especialmente en fases de pruebas y validación.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo bajo, con verificación y validación constante en cada fase.
- **Entregas al Cliente:** Una única entrega al final, con validación en cada fase.
- **Curva de Aprendizaje:** Media. Se requiere disciplina en verificación y validación.
- **Velocidad de Desarrollo:** Media. Las fases de validación pueden ralentizar el desarrollo.
- **Manejo de Cambios:** Los cambios son complicados, requieren revalidación constante.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo bajo, debido a la verificación y validación constantes en cada fase.

F.7. Espiral

- **Naturaleza del Proyecto:** Proyectos grandes y complejos, con alto riesgo y múltiples iteraciones.

- **Requisitos del Cliente:** Los requisitos pueden refinarse en cada iteración, ideal para proyectos con incertidumbre.
- **Tamaño del Equipo:** Equipos medianos a grandes, flexibles en roles según los ciclos de iteración y gestión de riesgos.
- **Cultura Organizacional:** Cultura orientada a la gestión del riesgo y adaptación a cambios continuos en cada iteración.
- **Flexibilidad en Gestión:** Alta flexibilidad, con ciclos iterativos que permiten gestionar cambios de forma continua.
- **Documentación:** Documentación formal en cada iteración para gestionar riesgos y validar avances.
- **Riesgos y Control de Calidad:** Riesgo bajo, diseñado específicamente para gestionar riesgos en cada iteración.
- **Entregas al Cliente:** Entregas iterativas, con revisiones parciales hasta completar el proyecto.
- **Curva de Aprendizaje:** Alta. Complejidad en la gestión del riesgo y las iteraciones continuas.
- **Velocidad de Desarrollo:** Media. El proceso iterativo es más largo por la gestión de riesgos y planificación.
- **Manejo de Cambios:** Cambios gestionados de manera continua en cada ciclo, permitiendo ajustes según los riesgos.
- **Manejo de Riesgos:** Riesgo bajo, diseñado para gestionar riesgos en cada iteración de manera efectiva.

F.8. Selección de metodología

En base al análisis realizado, elegimos el modelo en V y Kanban como las metodologías más adecuadas, para el desarrollo de este proyecto de tesis, debido a sus características y beneficios particulares que se alinean con los requisitos y condiciones del proyecto.

En el proceso de elección de metodología, comenzamos prescindiendo el uso de las metodologías que no se ajustaban a las necesidades y características del proyecto. Luego, comparamos las metodologías restantes en función de los aspectos clave mencionados anteriormente, para determinar cuál se ajusta mejor a los objetivos y condiciones del proyecto.

En el proceso de selección de metodologías para este proyecto, en primer lugar, se desestimó el uso Scrum por varias razones específicas. Scrum, aunque es potente en proyectos que requieren flexibilidad y adaptación continua, fue filtrado principalmente porque necesita una presencia activa y constante del cliente o un Product Owner para guiar los sprints, lo cual no es posible en este proyecto. Además, la estructura de equipo pequeño y la falta de roles específicos como Scrum Master y Product Owner complican la implementación de Scrum, que además implica reuniones regulares intensivas que no se alinean con la capacidad del equipo, ya que cobran mayor sentido en proyectos con equipos más grandes con mayor diversidad de

roles y responsabilidades con necesidad de sincronización frecuente.

Por otro lado, la metodología en espiral, que se centra en la gestión de riesgos y adaptación a cambios continuos, fue considerada innecesariamente compleja para este proyecto dado que los riesgos y la incertidumbre son relativamente bajos y no justifican el tiempo adicional y la complejidad que esta metodología implicaría. Por estos motivos, se desestimó la metodología en espiral en favor de enfoques más simples y directos.

En base al análisis realizado sobre las metodologías restantes, elegimos el modelo en V y Kanban como las metodologías más adecuadas para el desarrollo de este proyecto de tesis, debido a sus características y beneficios particulares que se alinean con los requisitos y condiciones del proyecto. El modelo en V se seleccionó sobre el modelo en cascada aunque ambos son aplicables a equipos de cualquier tamaño y proyectos de cualquier envergadura. Ambos modelos se centran en la planificación y la documentación, lo cual es apropiado para este proyecto dado que los requerimientos están claramente definidos y la probabilidad de cambios y de riesgo es baja, gracias a una investigación y análisis exhaustivos realizados previamente.

El modelo en V ofrece la ventaja de validar y verificar cada módulo de software funcional antes de avanzar a la siguiente fase, permitiendo correcciones tempranas en caso de errores o cambios, lo que aumenta la flexibilidad y adaptabilidad del proyecto. Este enfoque de validación continua en cada fase contrasta con el modelo en cascada, que, aunque estructurado, avanza secuencialmente sin permitir el retroceso, lo que puede complicar la corrección de errores detectados en fases tardías. Por lo tanto, el modelo en V es preferido por su capacidad para manejar mejor el riesgo y por ofrecer una estructura que facilita la adaptación y mejora continua del proyecto.

Para este trabajo, este sistema de validación y verificación constante es especialmente valioso, ya que el sistema incluye un componente crítico, como lo es el contrato inteligente de trazabilidad en blockchain, que una vez desplegado, no puede ser actualizado para corregir errores, modificar comportamientos o añadir nuevas funcionalidades. Por lo tanto, es crucial que cada fase del desarrollo sea validada y verificada rigurosamente para garantizar la calidad y la integridad del sistema final antes de su despliegue.

Adicionalmente, se decidió integrar Kanban para la gestión de tareas y el seguimiento del flujo de trabajo durante el desarrollo. Kanban complementará al modelo en V al proporcionar una mayor flexibilidad en la gestión de micro-tareas y prioridades diarias, sin sobrecargar al pequeño equipo de trabajo. Esta metodología es ligera y fácil de implementar, y su naturaleza visual ayuda a mantener una vista clara del avance del proyecto, facilitando el seguimiento y la intervención rápida por parte del tutor y el estudiante.

La combinación de estas dos metodologías permitirá al equipo de trabajo mantener un equilibrio entre la rigurosidad y la flexibilidad, garantizando la calidad y la validación en cada fase del proyecto, mientras se mantiene la adaptabilidad y la eficiencia en la gestión de tareas diarias.

F.8.1. Implementación Conjunta de Metodologías

La implementación conjunta del modelo en V y Kanban será llevada a cabo utilizando un enfoque integrado que capitaliza las fortalezas de ambas metodologías. El modelo en V guiará la estructura general del proceso de desarrollo, asegurando que cada etapa del proyecto, desde la planificación hasta la validación, se ejecute con un enfoque en la calidad y la documentación rigurosa. Paralelamente, Kanban se aplicará dentro de cada etapa del modelo en V para gestionar y visualizar las tareas diarias. Esto permitirá controlar el progreso y hacer ajustes operativos sin comprometer la estructura metodológica del modelo en V. El uso de un tablero Kanban facilitará la visualización del estado de las tareas en tiempo real, promoviendo una gestión ágil que se ajusta a la dinámica del equipo y los requerimientos del proyecto.

La combinación de estas metodologías asegura un balance entre la rigurosidad y la flexibilidad dentro del proceso de desarrollo, permitiendo que el equipo mantenga una planificación clara y una gestión eficiente de tareas, al mismo tiempo que se enfoca en una entrega final de alta calidad y bien documentado.



USER FLOW

Contar el flujo de uso de la aplicación con screenshots de las pantallas y casos de uso de cada usuario.



RESULTADOS DE PRUEBAS AUTOMATIZADAS

Detallar para cada repositorio la lista de los títulos de las pruebas unitarias (son alrededor de 600 pruebas entre todo).

Detallar también la lista de casos de prueba de tests de integración.

Detallar la lista de pruebas manuales realizadas.

Contar la lista de bugs levantados y resueltos o desestimados.



USER ACCEPTANCE TESTING

Detallar la lista de pruebas manuales realizadas por los testers voluntarios, bugs levantados y resueltos, Adjuntar fotos del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H.-O. Pörtner et al., eds. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In Press. Cambridge University Press, 2022.
- [2] Josep Lluís Pelegrí. «Informe IPCC: Certezas e incertidumbres sobre el cambio climático». En: (2021).
- [3] J. I. Arroyo et al. *Clima. El gato y la caja*, 2022.
- [4] Clayson Cosme Da Costa Pimenta. «La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos». En: *Revista Economía y Política* 35 (2022), págs. 1-18.
- [5] Jesus R Melendez et al. «Economía Circular: Una Revisión desde los Modelos de Negocios y la Responsabilidad Social Empresarial». En: *Revista Venezolana de Gerencia: RVG* 26.6 (2021), págs. 560-573.
- [6] Reuben Schuitemaker et al. «Product traceability in manufacturing: A technical review». En: *Procedia CIRP* 93 (2020). 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020, págs. 700-705. ISSN: 2212-8271. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.078>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120306922>.
- [7] Gavina Baralla et al. «Waste management: A comprehensive state of the art about the rise of blockchain technology». En: *Computers in Industry* 145 (2023), pág. 103812.
- [8] Katarzyna Bułkowska et al. «Implementation of Blockchain Technology in Waste Management». En: *Energies* 16.23 (2023), pág. 7742.
- [9] Eiman Alnuaimi et al. «Blockchain-based system for tracking and rewarding recyclable plastic waste». En: *Peer-to-Peer Networking and Applications* 16.1 (2023), págs. 328-346.
- [10] Signeblock. *Soluciones de valor para la transformación digital de las empresas*. Sitio web. Disponible en <https://www.signeblock.com/trazabilidad-blockchain-so-5-es>. 2024.
- [11] NU CEPAL. «Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora». En: (2021).

- [12] Verallia. «Reimagining reuse for the circular economy of glass: Stakeholder Perspectives Series». En: (2022). URL: https://www.verallia.com/re-use/en/publication/contents/templates/VERALLIA_WHITE-BOOK_EN.pdf (visitado 14-07-2024).
- [13] Unknown. *Pending Reference*. Jul. de 2025. URL: <https://google.com>.
- [14] Satoshi Nakamoto. *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Original Bitcoin whitepaper. Oct. de 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [15] Farhana Akter Sunny et al. «A systematic review of blockchain applications». En: *Ieee Access* 10 (2022), págs. 59155-59177.
- [16] Gautami Tripathi et al. «A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges». En: *Decision Analytics Journal* 9 (2023), pág. 100344.
- [17] Vitalik Buterin et al. «Ethereum white paper». En: *GitHub repository* 1 (2013), págs. 22-23.
- [18] Alejandro Bartolomeo et al. «Introducción a la tecnología blockchain: su impacto en las Ciencias Económicas». En: *Ponencia presentada en Jornadas de Ciencias Económicas. Buenos Aires 7.8* (2020).
- [19] V Verma. «An overview of Blockchain Technology: Past & Future». En: *Eduzone: International Peer Reviewed/Refereed Multidisciplinary Journal* 12.1 (2023), págs. 100-104.
- [20] Hamed Taherdoost. «Smart contracts in blockchain technology: A critical review». En: *Information* 14.2 (2023), pág. 117.
- [21] Jovan Kalajdjeski et al. «Databases fit for blockchain technology: A complete overview». En: *Blockchain: Research and Applications* 4.1 (2023), pág. 100116.
- [22] Charles Hoskinson. «Why we are building Cardano». En: *IOHK (accessed 18 December 2017) https://whycardano.com* (2017).
- [23] Karthik Kumar Vaigandla et al. «Review on blockchain technology: architecture, characteristics, benefits, algorithms, challenges and applications». En: *Mesopotamian Journal of CyberSecurity* 2023 (2023), págs. 73-84.
- [24] Abdel-Aziz Ahmad Sharabati et al. «Blockchain technology implementation in supply chain management: a literature review». En: *Sustainability* 16.7 (2024), pág. 2823.
- [25] Abderahman Rejeb et al. «The role of blockchain technology in the transition toward the circular economy: Findings from a systematic literature review». En: *Resources, Conservation & Recycling Advances* 17 (2023), pág. 200126.
- [26] Alberto Díez Arias et al. «Web 3.0 y Blockchain en la Educación Secundaria». En: (2023).
- [27] Michael JW Rennock et al. «Blockchain technology and regulatory investigations». En: *Practical Law Litigation* 1 (2018), págs. 35-44.

-
- [28] Juan Esteban Torres Castro et al. «Las tendencias en el uso del blockchain en el área de la cadena de suministro». En: (2022). URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12495/10594>.
 - [29] Emilio Cerdá et al. «Economía circular». En: *Economía industrial* 401.3 (2016), págs. 11-20.
 - [30] Ellen MacArthur Foundation. *What is a circular economy?* 2014. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview> (visitado 25-06-2024).
 - [31] Roger S Pressman. «Ingenería de software». En: *Un enfoque práctico* 7 (2010).
 - [32] Elli Androulaki et al. «Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains». En: *Proceedings of the thirteenth EuroSys conference*. 2018, págs. 1-15.
 - [33] Chris Dannen. *Introducing Ethereum and solidity*. Vol. 1. Springer, 2017.
 - [34] Gavin Wood. «Polkadot: Vision for a heterogeneous multi-chain framework». En: *White paper* 21.2327 (2016), pág. 4662.
 - [35] Zongda She. «Vechain: A renovation of supply chain management—A look into its organization, current activity, and prospect». En: *Proceedings of the 2022 International Conference on Educational Informatization, E-commerce and Information System, Macao, China*. 2022, págs. 29-30.
 - [36] Manuel Chakravarty et al. *Functional blockchain contracts*. 2019.
 - [37] Verallia. *Proceso de fabricación del vidrio*. 2024. URL: <https://es.verallia.com/s/proceso-de-fabricacion-del-vidrio?language=es> (visitado 09-07-2024).
 - [38] Hamzah Alaidaros et al. «The state of the art of agile kanban method: challenges and opportunities». En: *Independent Journal of Management & Production* 12.8 (2021), págs. 2535-2550.

