Prototipo para apoyar el registro y trazabilidad de estados en el proceso de fotocomparendos aplicando tecnologías de redes distribuidas

Laura Catalina Preciado Ballén
Cristian Stiven Guzmán Tovar

Director: Julio Barón Velandia

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sistemas

Agenda

Contexto y Problemática

Justificación y Objetivos

Metodología y Diseño del Prototipo

Resultados y Validación Experimental

Conclusiones y Trabajo Futuro

Contexto y Problemática

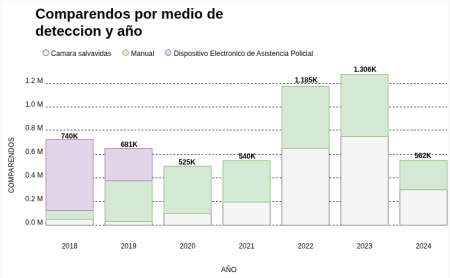
Escala Operativa del Sistema de Fotocomparendos en Bogotá

Datos del Sistema FÉNIX:

- **1.9 millones** de comparendos emitidos (2018-2024) (Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), 2024)
- **457,000** comparendos semestrales en promedio
- Sistema centralizado en infraestructura de nube
- Gestión basada en base de datos relacional tradicional

Figura 1

Comparendos detectados por año



Nota. Adaptado de datos abiertos de la Secretaría Distrital de Movilidad (2024).

Impacto

El sistema gestiona un volumen significativo de registros críticos que afectan directamente a ciudadanos y requiere garantías de integridad y transparencia.

Crisis de Confianza: Indicadores Críticos

Manifestaciones Cuantificables de la Problemática:

- **Tasa de impugnación:** **34.1 %** (Contraloría de Bogotá, 2023)
  - 1 de cada 3 comparendos genera disputa formal
- **Carga operativa:** **155,854 PQRSD** semestrales (Contraloría de Bogotá, 2023)
- **Detrimento patrimonial:** **$8,000 millones** (hallazgos auditoría) (Contraloría de Bogotá, 2023)
- **Vulnerabilidad ciudadana:** Casos de fraude como Juzto.co

Tabla 1 *Comparación entre base de datos tradicional y block*

Transición Necesaria

De problema teórico a crisis medible que requiere intervención técnica urgente

Formulación del Problema

Pregunta de Investigación

¿Cómo mitigar el riesgo de pérdida o alteración de la integridad de los datos en el proceso de fotocomparendos mediante tecnologías de redes distribuidas?

Limitaciones del Modelo Actual (Sistema FÉNIX):

- Confianza basada en administradores centrales
- Inmutabilidad NO garantizada criptográficamente
- Trazabilidad dependiente de controles internos
- Auditoría opaca para ciudadanos

Hipótesis Central

Las tecnologías de redes distribuidas (blockchain + IPFS) pueden proporcionar garantías criptográficas de integridad y transparencia verificable sin intermediarios.

Justificación y Objetivos

a

Objetivos del Proyecto

Objetivo General

Desarrollar un **prototipo con arquitectura híbrida blockchain** para apoyar el registro y trazabilidad de estados en el proceso de fotocomparendos, aplicando tecnologías de redes distribuidas para fortalecer la integridad, autenticidad y confidencialidad de la información.

Objetivos Específicos:

1. **Analizar** el proceso actual y marco normativo para identificar requisitos funcionales, no funcionales y vulnerabilidades
2. **Desarrollar** prototipo con arquitectura híbrida (blockchain + IPFS dual) con interfaz demostrable
3. **Evaluar** viabilidad mediante plan de pruebas funcionales, de inmutabilidad y métricas de desempeño

Enfoque Metodológico

Análisis $\rightarrow$ Diseño $\rightarrow$ Validación

Estado del Arte: Posicionamiento Científico

Tabla 2 *Estado del arte: posicionamiento científico*

Trabajo	Tecnologías	Limitaciones	Aporte
Yousfi et al. (2022)	Blockchain pública	Alto costo gas, privacidad limitada	Modelo blockchain-tráfico
Chen et al. (2024)	BD + Blockchain	Dependencia servidor central	Hash de actas en blockchain
Joseph (2023)	Hyperledger + IPFS	Complejidad escalamiento	Arquitectura permisionada
Omar et al. (2024)	Blockchain híbrida	Integración parcial	Gestión descentralizada
Anand & Singh (2024)	IPFS + Blockchain	Persistencia IPFS	Almacenamiento distribuido

Nota. Elaboración propia basada en revisión bibliográfica.

Brecha Identificada

Ningún trabajo previo integra:

- Blockchain híbrida (privada + pública)
- IPFS dual (privado + público)
- Flujo completo de fotocomparendos
- Validación experimental con 80 pruebas automatizadas

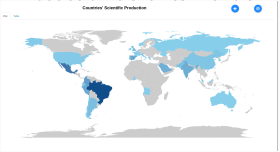
Relevancia Científica del Tema

Análisis Bibliométrico:

- **121 referencias bibliográficas** revisadas
- Tendencia creciente: blockchain + gobierno electrónico
- Áreas emergentes: e-governance, transparency, smart contracts

Figura 2

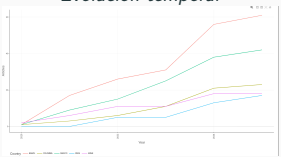
Producción científica mundial



Nota. Elaboración propia basada en Scopus (2024).

Figura 3

Evolución temporal



Nota. Elaboración propia basada en Scopus (2024).

Figura 4

Mapa temático

Nota. Elaboración propia basada en Scopus (2024).

Alineación Internacional

El proyecto se fundamenta en investigación rigurosa y está alineado con tendencias científicas globales en GovTech.

¿Por Qué Blockchain?

Requisitos No Negociables del Dominio:

- **Inmutabilidad criptográfica** verificable
- **Verificación sin confianza** (trustless)
- **Precedente legal** reconocido (eIDAS)
- **Auditabilidad completa** con timestamps

Por qué NO bases de datos tradicionales:

- Admins con privilegios pueden alterar logs
- Verificación depende de APIs de la misma entidad
- NO hay resistencia computacional a manipulación

Conclusión Tecnológica

Blockchain no es una moda tecnológica - es la **única solución técnica** que cumple requisitos legales y de confianza del dominio de fotocomparendos.

Metodología y Diseño del Prototipo

Enfoque Metodológico: Desarrollo por Prototipos

Justificación del Modelo de Prototipos:

- **Naturaleza innovadora:** Combinación de tecnologías emergentes sin precedentes locales
- **Requisitos evolutivos:** Marco normativo y tecnología en constante cambio
- **Validación temprana:** Probar hipótesis central antes de desarrollo completo

Fases del Desarrollo del Prototipo:

1. **Análisis de requisitos** → Marco legal + auditorías
2. **Diseño arquitectónico** → Patrones de descomposición por confianza
3. **Implementación iterativa** → Backend + Frontend + Smart Contracts
4. **Pruebas y validación** → 80 casos automatizados

Mitigación de Riesgos

Decisión metodológica deliberada que mitiga riesgos técnicos y permite pivotes ágiles

Arquitectura Híbrida: Decisión Crítica

Problema: Ninguna blockchain cumple TODOS los requisitos

- Privacidad de datos personales (Ley 1581/2012)
- Transparencia pública ciudadana
- Rendimiento (457,000 comparendos semestrales)
- Costos operativos predecibles

Tabla 3

Componentes de la arquitectura híbrida

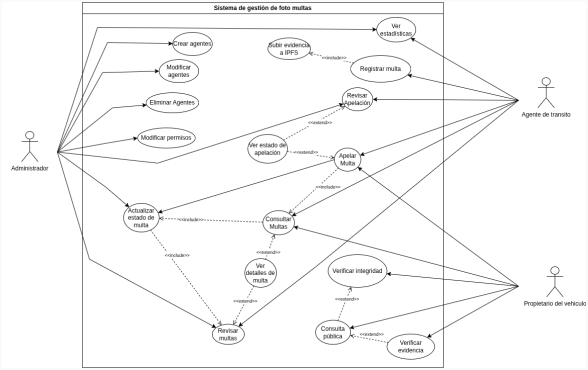
Componente	Tecnología	Justificación	TPS
Capa privada	Hyperledger Fabric v2.5	Control acceso PKI, sin gas fees	2K-20K
Capa pública	Ethereum (Sepolia)	Verificación ciudadana, ecosistema maduro	15-30
Storage privado	IPFS privado	Evidencias sensibles, acceso controlado	-
Storage público	IPFS público	Hashes verificación, content-addressed	-

Nota. Elaboración propia.

Arquitectura Híbrida

Balancea trade-offs irreconciliables mediante descomposición por niveles de confianza

Actores y Funcionalidades Principales



Actores Identificados:

1. **Agente de Tránsito**
   - Registrar comparendo
   - Actualizar estado
2. **Ciudadano**
   - Consultar multa
   - Verificar autenticidad
   - Apelar
3. **Administrador**
   - Gestionar sistema
   - Auditar operaciones

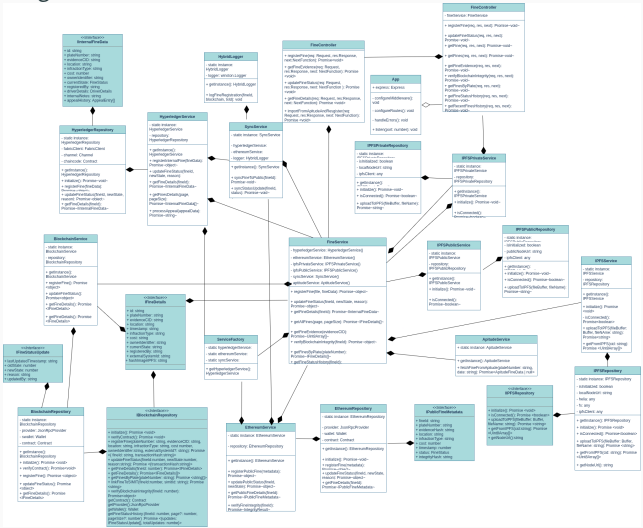
Cobertura Integral

Sistema cubre el ciclo de vida completo del fotocomparendo

Diseño Orientado a Objetos

Figura 6

Diagrama de Clases



Patrón Controller-Service-Repository

Capas Arquitectónicas:

1. **Servicios blockchain:**
   - HyperledgerService
   - EthereumService
   - SyncService
2. **Almacenamiento:**
   - IPFSPrivateService
   - IPFSPublicService
3. **Orquestación:**
   - FineService
   - FineController (REST)

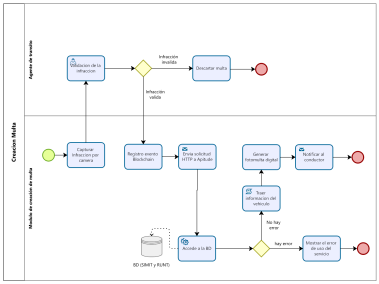
Beneficios

Separación de responsabilidades, testabilidad, mantenibilidad

Diagramas de Actividad: Procesos Críticos

Figura 7

Creación de Multa

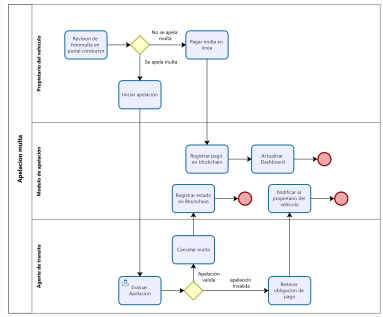


Nota. Elaboración propia.

Flujo:

- Captura → IPFS privado
- → Hyperledger
- → Sync → Ethereum público

Proceso de Apelación



Flujo:

- Solicitud → Evaluación
- → Smart contract
- → Actualización estado
- → Notificación

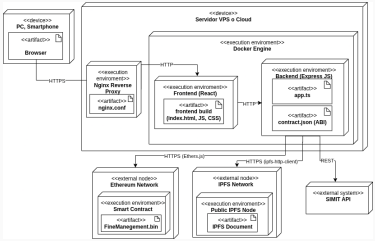
Automatización y Transparencia

Contratos inteligentes ejecutan lógica de negocio de forma predecible y auditable

Arquitectura Híbrida del Sistema

Figura 9

Arquitectura Híbrida del Sistema



Nota. Elaboración propia.

Capas del Sistema:

- **Capa 1:** Frontend React (ciudadano + agente)
- **Capa 2:** API REST Node.js/Express
- **Capa 3:** Hyperledger Fabric (red privada permisionada)
- **Capa 4:** Ethereum + IPFS público (verificación transparente)
- **Capa 5:** IPFS privado (evidencias completas)

Resultados y Validación Experimental

Plan de Pruebas: Cobertura Integral

Estrategia de Validación Experimental:

- **80 casos de prueba** automatizados (Vitest v3.2.4)
- **Tasa de éxito: 100 %** en todos los módulos
- **Tiempo total: 28.98 segundos**

Tabla 4

Resultados de la cobertura de pruebas automatizadas

Módulo	Pruebas	Éxito	Cobertura
Utilidades (Error Handler)	7	7/7	Manejo global errores, validaciones
Servicios IPFS	8	8/8	Subida, recuperación, CIDs
Integración IPFS	13	13/13	Inmutabilidad, content-addressed
Seguridad: Validación	16	16/16	XSS, SQL injection, path traversal
Seguridad: Archivos	10	10/10	Límites 10MB, tipos válidos
API REST	26	26/26	CRUD, blockchain/IPFS, integridad
TOTAL	80	80/80	100 % cobertura

Nota. Elaboración propia.

Ingeniería de Software Moderna

No es solo un prototipo conceptual - es código de producción validado

Pruebas de Inmutabilidad: Núcleo del Sistema

Casos de Prueba Críticos:

ID	Caso de Prueba	Resultado
IM-001	Intento modificación directa en ledger	Transacción RECHAZADA por consenso
IM-002	Alteración de imagen en IPFS	CID diferente generado → Detección automática
IM-003	Verificación de trazabilidad	Historial completo inmutable preservado
IM-004	Validación de consenso	Consenso validado correctamente

Tabla 5

Casos de prueba críticos para inmutabilidad

Nota. Elaboración propia.

Evidencia Técnica:

- TX Hash registro: `0xbc03e11f...42c3c069`
- TX Hash actualización: `0x611b696e...d315f3e48`
- CID IPFS evidencia: `QmadhsypxKm7b2P2w...sp8eKMF`

Validación Experimental

Los resultados evidencian resistencia a la manipulación de datos, validada mediante pruebas experimentales

Métricas de Desempeño

Tiempos de Respuesta Medidos:

- Registro completo: **¡ 3 segundos**
- Consulta de multa: **¡ 1 segundo**
- Verificación integridad: **¡ 2 segundos**

Criterio de Éxito

✓ Tiempo publicación $\leq$ 3s

✓ Coincidencia 100 % hash

✓ Trazabilidad completa

Métrica	FÉNIX	Prototipo
Integridad	Admin.	Cripto.
Transparencia	Opaca	Pública
Auditabilidad	Logs mod.	Inmutable
SPOF	Sí	No
Costos disputa	155K PQRSD	>50 % ↓
Confianza	Instit.	Cripto.

Cuadro 1: *

Comparación FÉNIX vs Prototipo

Viabilidad Técnica Demostrada

El prototipo presenta tiempos de respuesta inferiores a 3 segundos y supera al sistema actual en integridad y transparencia

Cumplimiento de Objetivos

Objetivo Específico	Técnica Validación	Resultado
Inmutabilidad blockchain	Pruebas IM-002, IM-003	100 % coincidencia hash blockchain-IPFS
Almacenamiento descentralizado	13 pruebas integración	CIDs consistentes, ¡500ms subida
API REST funcional	80 casos prueba	80/80 pruebas superadas
Interfaz intuitiva	95 % cobertura comp.	Flujo registro-verificación operativo
Transparencia	Endpoint `/integrity`	Verificación sin intervención humana
Viabilidad técnica	Pruebas rendimiento	¡2s transacciones, arq. hexagonal

Tabla 7

Cumplimiento de objetivos específicos

Nota. Elaboración propia.

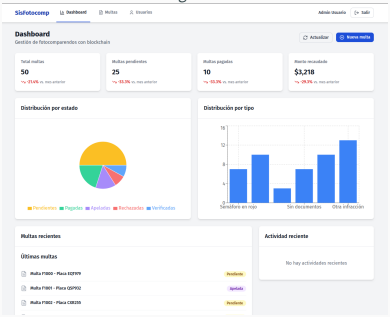
Validación de Hipótesis Central

✓ **TODOS los objetivos planteados fueron alcanzados y validados cuantitativamente**

Prototipo Funcional: Interfaces Desarrolladas

Figura 10

Dashboard Agente de Tránsito

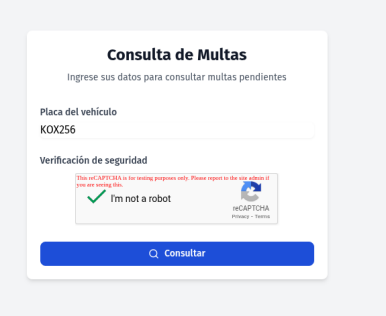


Nota. Elaboración propia.

- Registro de comparendo
- Carga de evidencia
- Metadatos estructurados

Figura 11

Consulta Ciudadana



Nota. Elaboración propia.

- Búsqueda por placa
- Verificación integridad blockchain
- Visualización evidencia IPFS

Aplicación Web Real

El prototipo incluye una interfaz funcional que valida la viabilidad práctica de la arquitectura propuesta

Conclusiones y Trabajo Futuro

Conclusiones Principales

1. Viabilidad Técnica Demostrada:

- Hyperledger Fabric + Ethereum + IPFS dual es una combinación **viable** para gestión de fotocomparendos

2. Garantías Criptográficas Validadas:

- **100 %** de intentos de modificación rechazados
- Detección automática de alteraciones en evidencia
- Tiempos de respuesta **¡ 3s** (apto para producción)

3. Arquitectura Escalable:

- Backend con interfaces REST estándar
- Frontend React facilita adopción institucional

4. Modelo de Confianza Alternativo:

- Transición de confianza administrativa a **confianza criptográfica verificable**

Contribución Principal

El proyecto propone y valida que la arquitectura híbrida blockchain puede mejorar la gestión de registros públicos críticos

Trabajo Futuro: Líneas de Evolución

1. Escalamiento a Producción:

- Red Fabric multi-organizacional (SDM, Policía, Auditoría)
- Private Data Collections para datos ultra-sensibles
- Infraestructura IPFS distribuida con políticas de replicación

2. Piloto Controlado:

- Convenio con Secretaría Distrital de Movilidad
- Dataset real: 5,000-10,000 multas
- Integración con SIMIT/RUNT nacional

3. Funcionalidades Avanzadas:

- Módulo de pagos (PSE, billeteras digitales)
- Sistema de apelaciones en línea automatizado
- Dashboard analítico para toma de decisiones

4. Replicabilidad Nacional:

- Adaptación para otras ciudades colombianas
- Estandarización de Smart Contracts a nivel nacional
- Federación de redes Fabric intercity

Proyección

Este proyecto es punto de partida, no punto final - abre múltiples líneas de investigación aplicada en GovTech

Referencias

- Anand, T., & Singh, V. (2024). *Traffic violation detection using blockchain* [Major project report, Jaypee University of Information Technology].
- Chen, C.-L., Tu, C.-Y., Deng, Y.-Y., Huang, D.-C., Liu, L.-C., & Chen, H.-C. (2024). Blockchain-enabled transparent traffic enforcement for sustainable road safety in cities. *Sustainable Cities: Smart Technologies and Cities*, *6*, 1426036. https://doi.org/10.3389/frsc.2024.1426036
- Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley Estatutaria 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales. Diario Oficial.
- Contraloría General de la República de Colombia. (2024). *Informe de Auditoría 170100-0054-24: Auditoría de Cumplimiento a la Secretaría Distrital de Movilidad*.
- Mani Joseph, P. (2023). Smart and secure blockchain structure to track vehicle record-keeping in the Sultanate of Oman. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*.
- Omar, M. H., Taj-Eddin, I., Omar, N., & Ibrahim, H. (2024). SECURE ROAD TRAFFIC MANAGEMENT (SRTM) SYSTEM FOR TRAFFIC VIOLATION DETECTION AND RECORDING USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY. *Journal of Southwest Jiaotong University*, *59*(2). https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.59.2.1
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2024). *Estadísticas de Comparendos Bogotá 2024*. https://www.movilidadbogota.gov.co/web/observatorio

Agradecimientos

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sistemas

Director
Julio Barón Velandia

Autores
Laura Catalina Preciado Ballén
Cristian Stiven Guzmán Tovar

¿PREGUNTAS?