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

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

Presentado por:

Laura Catalina Preciado Ballén

Cristian Stiven Guzmán Tovar

Director: Julio Barón Velandia, PhD **Jurado:** Roberto Pava Díaz, PhD

Agenda

Contexto y formulación del problema

Objetivos

Metodología e implementación

Validación y pruebas

Demostración del prototipo

Conclusiones y aportes

Trabajo futuro

Espacio de preguntas

Contexto y formulación del problema

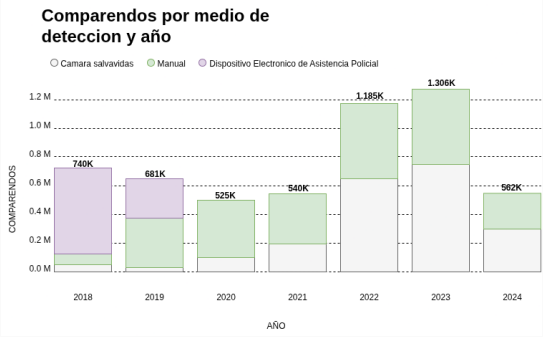
Contexto: el sistema de fotocomparendos en Bogotá

Escala operativa (Sistema FÉNIX):

- **1.9 millones** de comparendos emitidos entre 2018–2024 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2024)
- **457,000** comparendos semestrales en promedio
- Arquitectura centralizada (BD relacional)

Figura 1

Comparendos emitidos por semestre



Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad (2024).

Indicadores de la problemática

Gestión ciudadana

- Tasa de impugnación: **34.1 %**
- Carga operativa: **155,854 PQRSD** semestrales

Impacto fiscal

- Presunto detrimento patrimonial: **$8,000 millones** (Contraloría de Bogotá, 2024)

Vulnerabilidades identificadas:

- Fraude a ciudadanos mediante intermediarios ilegales (Semana, 2023)
- Confianza en administradores centrales sin garantías criptográficas
- Inmutabilidad no verificable por la ciudadanía
- Auditoría opaca para el control institucional

Formulación del problema

Pregunta de investigación

¿Cómo mitigar el riesgo de pérdida o alteración de la integridad de los datos asociados a todos los estados en el proceso de fotocomparendos en Bogotá mediante el uso de tecnologías de redes distribuidas que garanticen el registro, la trazabilidad, la autenticidad y la confidencialidad de la información?

Limitaciones del modelo actual (FÉNIX): confianza en administradores centrales, inmutabilidad no garantizada criptográficamente, trazabilidad dependiente de controles internos, auditoría opaca para la ciudadanía.

Hipótesis

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

Objetivos

Objetivo general

Objetivo general

Desarrollar un prototipo software tecnológico que facilite el registro y la trazabilidad de los estados en el proceso de fotocomparendos en Bogotá, mediante la aplicación de tecnologías de redes distribuidas, para el fortalecimiento de la integridad y autenticidad de la información reduciendo los riesgos asociados a su confidencialidad.

Objetivos específicos

1. **Analizar** el proceso actual de registro de fotocomparendos a partir del marco jurídico, regulatorio e informes de auditoría, para identificar vulnerabilidades, requisitos funcionales y no funcionales.

2. **Desarrollar** un prototipo con arquitectura híbrida basado en blockchain permisionado (Hyperledger Fabric) y blockchain público (Ethereum), integrando almacenamiento distribuido mediante IPFS.

3. **Evaluar** la viabilidad técnica y funcional mediante un plan de pruebas que incluya inmutabilidad, trazabilidad, rendimiento y verificación de integridad de documentos.

Metodología e implementación

Enfoque metodológico: desarrollo por prototipos

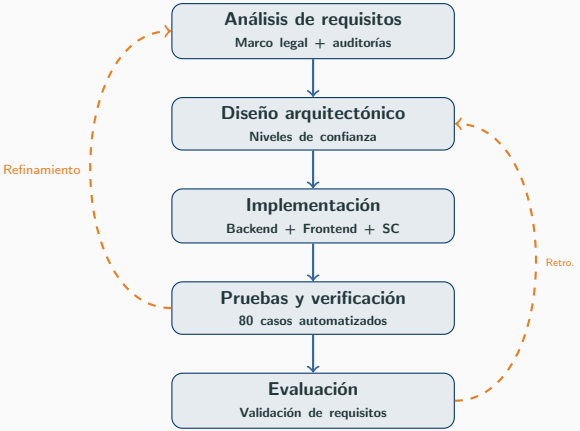
Justificación del modelo:

- **Naturaleza exploratoria:** tecnologías emergentes sin antecedentes locales
- **Requisitos evolutivos:** marco normativo en constante cambio
- **Verificación temprana:** validar hipótesis antes de escalar

Decisión metodológica

El modelo de prototipos permite mitigar riesgos técnicos y facilitar ajustes iterativos ante cambios normativos o tecnológicos.

Ciclo iterativo de prototipado



Arquitectura híbrida: decisión de diseño

Problema: una sola plataforma blockchain no satisface simultáneamente todos los requisitos.

- Privacidad de datos personales (Ley 1581/2012)
- Transparencia pública ciudadana (Ley 1712/2014)
- Rendimiento (457,000 comparendos semestrales)
- Costos operativos predecibles

Tabla 1

Componentes de la arquitectura híbrida

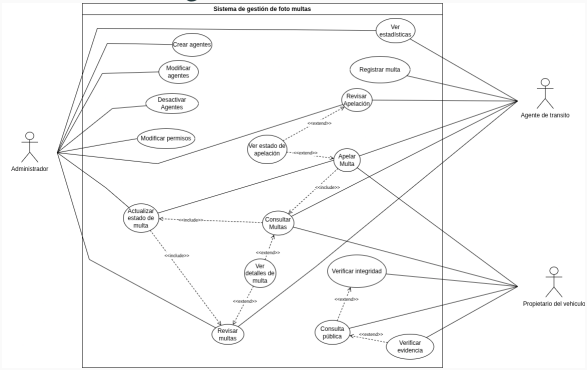
Componente	Tecnología	Justificación	TPS
Capa privada	Hyperledger Fabric v2.5	Control de acceso PKI, sin gas fees	2K–20K
Capa pública	Ethereum (Sepolia)	Verificación ciudadana	15–30
Storage privado	IPFS privado	Evidencias sensibles	–
Storage público	IPFS público	Hashes de verificación	–

Nota: Componentes de la arquitectura.

Actores y funcionalidades principales

Figura 2

Diagrama de casos de uso



Nota: Modelado UML del sistema.

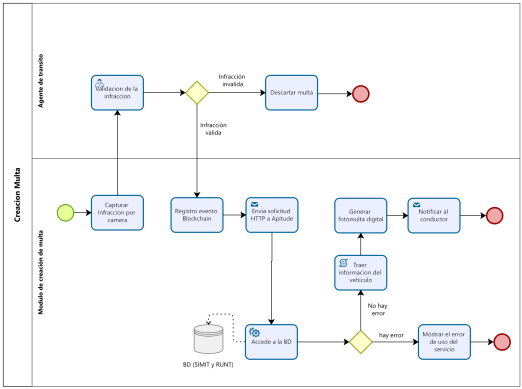
Actores identificados:

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

Flujos de proceso: diagramas de actividades

Figura 3

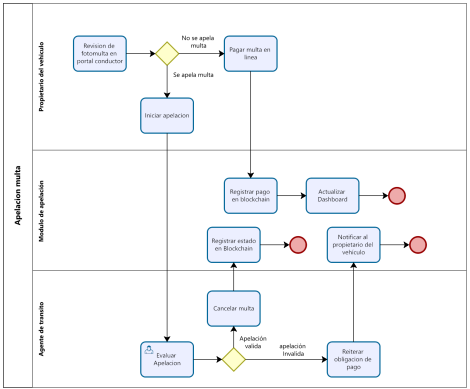
Registro de multa



Nota: Diagrama de actividades del sistema.

Figura 4

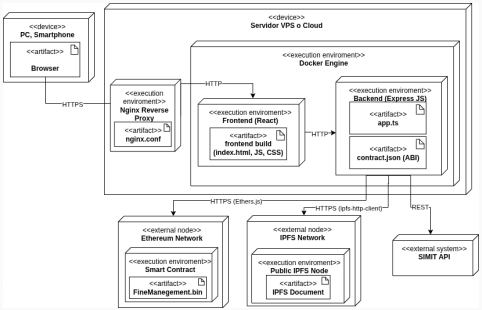
Proceso de apelación



Nota: Diagrama de actividades del sistema.

Figura 5

Diagrama de despliegue del sistema



Nota: Arquitectura del sistema desplegado.

Capas: 1. Frontend React — **2.** API REST Node.js/Express — **3.** Hyperledger Fabric (privado) — **4.** Ethereum (público) — **5.** IPFS (almacenamiento distribuido)

Alcance y delimitaciones del estudio

Delimitaciones metodológicas del prototipo:

- **Datos sintéticos:** la verificación se realizó con datos generados mediante scripts de prueba, dado que no se dispuso de acceso a datos reales del FÉNIX, RUNT ni SIMIT.
- **Cobertura parcial de estados:** se implementaron 5 de los 8 estados del ciclo de vida (PENDING, PAID, APPEALED, RESOLVED_APPEAL, CANCELLED).
- **Volumen controlado:** se emplearon entre 50 y 100 comparendos de prueba, frente a los 457,000 semestrales registrados en producción.
- **Verificación técnica:** los resultados corresponden a una *verificación* en entorno controlado, no a una *validación* operativa institucional.

Nota metodológica

Se distingue entre *verificación* (el sistema cumple las especificaciones de diseño) y *validación* (el sistema opera adecuadamente en condiciones reales). Este trabajo se enmarca en la primera categoría.

Validación y pruebas

Plan de pruebas: cobertura del prototipo

Estrategia: **80 casos de prueba** automatizados — **Tasa de éxito: 100 %** — **Tiempo total: 28.98s**

Tabla 1

Resultados del plan de pruebas por módulo

Módulo	Pruebas	Éxito	Cobertura
Utilidades (Error Handler)	7	7/7	Manejo global de errores
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
Total	**80**	**80/80**	**100 % cobertura funcional**

Nota: Resultados de pruebas del prototipo.

Pruebas de inmutabilidad

Tabla 2

Resultados de pruebas de inmutabilidad

ID	Caso de prueba	Resultado
IM-001	Modificación directa en ledger	Transacción rechazada por consenso
IM-002	Alteración de imagen en IPFS	CID diferente → Detección automática
IM-003	Verificación de trazabilidad	Historial inmutable preservado
IM-004	Validación de consenso	Consenso validado correctamente

Nota: Pruebas de inmutabilidad ejecutadas.

Evidencia: TX registro: `0xbc03e11f...42c3c069` — TX actualización: `0x611b696e...d315f3e48` — CID: `QmadhsypxKm7...sp8eKMF`

Resultado

En el entorno experimental, el prototipo rechazó el 100 % de los intentos de modificación no autorizada.

Métricas de desempeño

Tiempos de respuesta medidos:

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

Criterios de éxito

✓ Tiempo de publicación $\leq$ 3s

✓ Coincidencia 100 % hash

✓ Trazabilidad completa en entorno de prueba

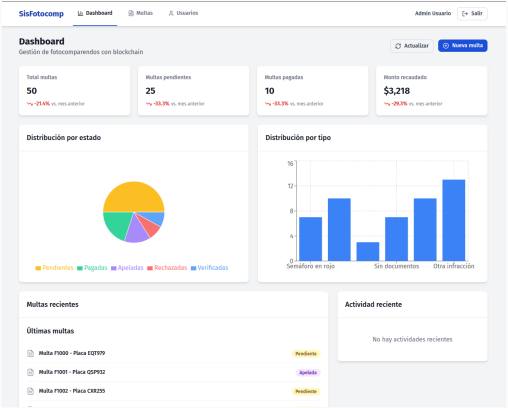
Resultado general

Todos los criterios de aceptación fueron satisfechos en el entorno experimental. Los tiempos de respuesta se mantuvieron dentro de los umbrales definidos en el plan de pruebas.

Interfaces del prototipo

Figura 6

Dashboard del agente de tránsito



Nota: Interfaz del prototipo desarrollado.

Figura 7

Consulta y verificación ciudadana

Nota: Interfaz del prototipo desarrollado.

Demostración del prototipo

Demostración del prototipo

Entorno de despliegue:

- **Servidor:** Grupo GNU Linux
- **Institución:** Universidad Distrital
- **URL:** `fotomultas.glud.org`
- **Recursos:** 8 vCPU, 16GB RAM
- **SO:** Ubuntu Server 22.04 LTS

Componentes desplegados:

- Backend API (Node.js - Puerto 3000)
- Frontend Web (React - Puerto 80)
- Red Hyperledger Fabric
- Nodo IPFS local
- Conexión Ethereum Sepolia

Acceso al sistema

El prototipo está disponible públicamente para validación. Se demostrará el registro en Hyperledger Fabric, la publicación de hashes en Ethereum y el almacenamiento de evidencias en IPFS.

Conclusiones y aportes

Conclusiones principales

1. Viabilidad técnica demostrada:

- La arquitectura híbrida (Hyperledger Fabric + Ethereum + IPFS dual) demostró ser viable para la gestión de fotocomparendos en el entorno experimental.

2. Garantías criptográficas verificadas:

- 100 % de intentos de modificación no autorizada rechazados satisfactoriamente.
- Detección automática de alteraciones mediante *content-addressing* (CIDs).
- Tiempos de respuesta dentro de los criterios de aceptación ($\leq$ 3s).

3. Modelo de confianza alternativo:

- Transición hacia confianza criptográfica verificable, conciliando privacidad (Ley 1581/2012) y transparencia (Ley 1712/2014).

Trabajo futuro

Trabajo futuro

1. Validación operativa:

- Piloto controlado con 5,000–10,000 multas reales
- Integración con SIMIT/RUNT mediante APIs reales
- Estudios de aceptación tecnológica (TAM/UTAUT) con agentes de tránsito y ciudadanos

2. Escalamiento a producción:

- Red Fabric multi-organizacional (SDM, Policía, Contraloría)
- Migración a soluciones Layer 2 (Polygon, Arbitrum)
- Auditoría formal de seguridad (Slither, MythX)

3. Evaluación e integración con FÉNIX:

- Integración con el sistema FÉNIX de Bogotá
- Implementación de los estados faltantes del ciclo completo
- Módulo de pagos (PSE, billeteras digitales)

4. Replicabilidad:

- Adaptación para otras ciudades colombianas
- Estandarización de contratos inteligentes a nivel nacional
- Federación de redes Fabric intercity

Perspectiva

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica para futuras investigaciones orientadas a la validación operativa e institucional del sistema propuesto.

Referencias principales (1/2)

- Contraloría General de la República de Colombia. (2024). Informe de Auditoría 170100-0054-24: Auditoría de Cumplimiento a la Secretaría Distrital de Movilidad [Auditoría realizada a la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá D.C.].
- Yousfi, N., Kmimech, M., Abbassi, I., Hamdi, H., & Graiet, M. (2022). ITS Traffic Violation Regulation Based on Blockchain Smart Contracts. *International Conference on Computational Collective Intelligence*, 459-471. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16210-7_38
- 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
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H.-N., Chen, X., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International journal of web and grid services*, *14*(4), 352-375
- Adel, K., Elhakeem, A., & Marzouk, M. (2023). Decentralized System for Construction Projects Data Management Using Blockchain and IPFS. *Journal of Civil Engineering and Management*, *29*(4), 342-359

Referencias principales (2/2)

- Antonopoulos, A. M., & Harding, D. A. (2023). *Mastering Bitcoin: Programming the Open Blockchain*. O'Reilly Media
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System.
- van Steen, M., & Tanenbaum, A. S. (2017). *Sistemas Distribuidos* (3.ª ed.) [Traducción de Distributed Systems, 3rd edition]. distributed-systems.net. https://www.distributed-systems.net/index.php/books/ds3/
- Cachin, C. (2018). Architecture of the Hyperledger Blockchain Fabric [Accessed: 2025-05-07]. *arXiv preprint arXiv:1801.10228*. https://arxiv.org/abs/1801.10228
- Benet, J. (2014). IPFS—Content Addressed, Versioned,P2P File System. https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.3561

Agradecimientos

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

Director

Julio Barón Velandia, PhD

Jurado

Roberto Pava Díaz, PhD

Grupo académico

GLUD — GNU/Linux Universidad Distrital

Espacio de preguntas