



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

14 de diciembre de 2025

Agenda

Contexto y Problemática

Justificación y Objetivos

Metodología y Diseño del Prototipo

Resultados y Validación Experimental

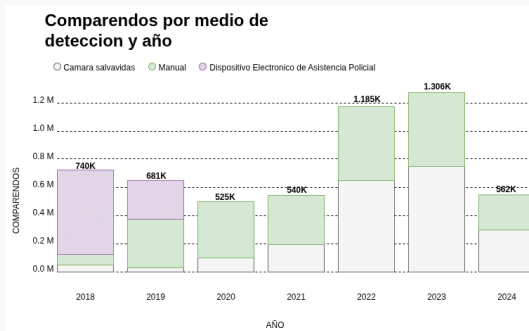
Conclusiones y Trabajo Futuro

Contexto y Problemática

Escala Operativa del Sistema de Fotocomparendos en Bogotá

Datos del Sistema FÉNIX:

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



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

| Aspecto | BD | Blockchain |
|---------------|-------------|-------------|
| Confianza | Central | Distribuida |
| Inmutabilidad | NO | SÍ |
| Trazabilidad | Limitada | Completa |
| Corrupción | Alto riesgo | Bajo riesgo |

Cuadro 1: *

Comparación BD tradicional vs Blockchain

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

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 → Diseño → Validación

| 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 |

Brecha Identificada

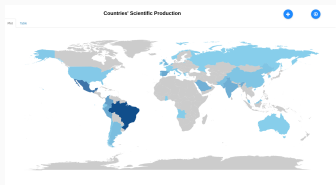
Ningún trabajo previo integra:

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

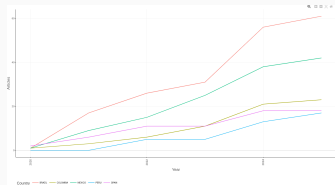
Relevancia Científica del Tema

Análisis Bibliométrico:

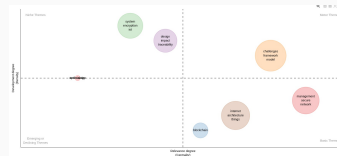
- **121 referencias bibliográficas** revisadas
- Tendencia creciente: blockchain + gobierno electrónico
- Áreas emergentes: e-governance, transparency, smart contracts



Producción científica mundial



Evolución temporal



Mapa temático

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

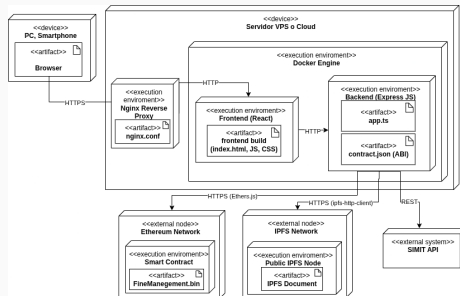
- Privacidad de datos personales (Ley 1581/2012)
- Transparencia pública ciudadana
- Rendimiento (457,000 comparendos semestrales)
- Costos operativos predecibles

| 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 | - |

Arquitectura Híbrida

Balancea trade-offs irreconciliables mediante descomposición por niveles de confianza

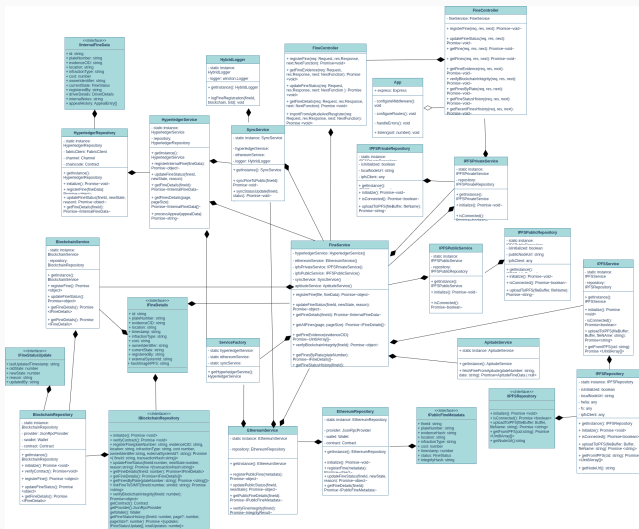
Arquitectura Híbrida del Sistema



Capas del Sistema:

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

Diseño Orientado a Objetos



Patrón Controller-Service-Repository

Capas Arquitectónicas:

1. Servicios blockchain:

- HyperledgerService
- EthereumService
- SyncService

2. Almacenamiento:

- IPFSPrivateService
- IPFSPublicService

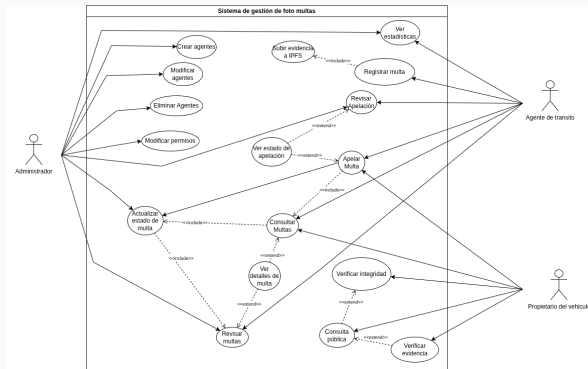
3. Orquestación:

- FineService
- FineController (REST)

Beneficios

Separación de responsabilidades, testabilidad, mantenibilidad

Actores y Funcionalidades Principales



Actores Identificados:

1. Agente de Tránsito

- Registrar comparendo
- Actualizar estado

2. Ciudadano

- Consultar multa
- Verificar autenticidad
- Apelar

3. Administrador

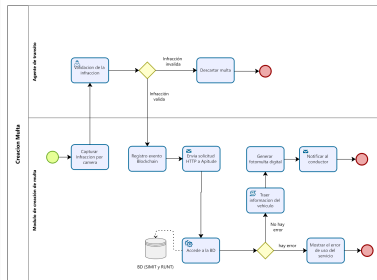
- Gestionar sistema
- Auditar operaciones

Cobertura Integral

Sistema cubre el ciclo de vida completo del fotocomparendo

Diagramas de Actividad: Procesos Críticos

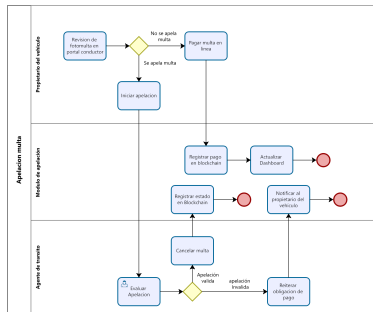
Creación de Multa



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

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**

| 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 |

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 |

Evidencia Técnica:

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

Validación Experimental

El sistema REALMENTE previene manipulación - no es teórico, está comprobado

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 2: *

Comparación FÉNIX vs Prototipo

Viabilidad Técnica Demostrada

El sistema es RÁPIDO y SUPERIOR al actual en dimensiones críticas

Cumplimiento de Objetivos

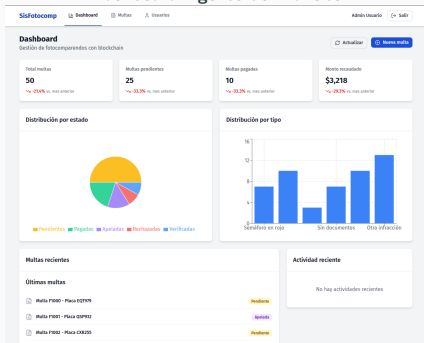
| Objetivo Específico | Técnica Validación | Resultado |
|--------------------------------|------------------------|---|
| Inmutabilidad blockchain | Pruebas IM-002, IM-003 | 100 % coincidencia hash blockchain-IPFS |
| Almacenamiento descentralizado | 13 pruebas integración | CIDs consistentes, ¡500ms 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 |

Validación de Hipótesis Central

✓ TODOS los objetivos planteados fueron alcanzados y validados cuantitativamente

Prototipo Funcional: Interfaces Desarrolladas

Dashboard Agente de Tránsito



- Registro de comparendo
- Carga de evidencia
- Metadatos estructurados

Consulta Ciudadana

The Citizen Query interface allows users to check for pending fines. It includes a form for the vehicle plate number (K0X256) and a security verification step using reCAPTCHA. A blue button labeled 'Consultar' is at the bottom.

Consulta de Multas

Ingrese sus datos para consultar multas pendientes

Placa del vehículo
K0X256

Verificación de seguridad

This reCAPTCHA is for testing purposes only. Please report to the site admin if you are seeing this.

I'm not a robot

reCAPTCHA
Privacy - Terms

Consultar

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

Aplicación Web Real

No es solo arquitectura abstracta - es una aplicación FUNCIONAL que demuestra viabilidad práctica

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 NO solo propone - **DEMUESTRA** que blockchain híbrida puede transformar 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



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?