

Movilidad  
Gestión de espectro  
Agricultura de precisión

Ricardo Salazar Cabrera

William Arleth Cruz López

Oscar Arley Orozco Sarasti

Álvaro Pachón de la Cruz

Andrés Navarro Cadavid

Gonzalo Llano Ramírez



**BITÁCORAS DE LA MAESTRÍA**

**MOVILIDAD  
GESTIÓN DE ESPECTRO  
AGRICULTURA DE PRECISIÓN**



**BITÁCORAS DE LA MAESTRÍA**

**MOVILIDAD  
GESTIÓN DE ESPECTRO  
AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

*Ricardo Salazar Cabrera  
Álvaro Pachón de la Cruz  
William Arleth Cruz López  
Andrés Navarro Cadavid  
Oscar Arley Orozco Sarasti  
Gonzalo Llano Ramirez*

*Editorial Universidad Icesi, 2019*

### **Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión**

© Ricardo Salazar Cabrera, Álvaro Pachón de la Cruz, William Arleth Cruz López, Andrés Navarro Ca-  
david, Oscar Arley Orozco Sarasti, Gonzalo Llano Ramirez.

1 ed. Cali, Colombia. Universidad Icesi, 2019

172 p., 19x24 cm

Incluye referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-5590-05-2

<https://doi.org/10.18046/EUI/bm.1.2019>

1. Remote monitoring 2. Signal processing 3. Agriculture I.Tit  
621.38 – dc22

© Universidad Icesi, 2019

Facultad de Ingeniería

Colección: Bitácoras de la maestría, vol. 1

Rector: Francisco Piedrahita Plata

Decano Facultad de Ingeniería: Gonzalo Ulloa Villegas

Coordinador editorial: Adolfo A. Abadía



Producción y diseño: Claros Editores SAS.

Editor: José Ignacio Claros V.

Impresión: Carvajal Soluciones de Comunicación.

Impreso en Colombia / *Printed in Colombia*.

La publicación de este libro se aprobó luego de superar un proceso de evaluación doble ciego por dos pares expertos. El contenido de esta obra no compromete el pensamiento institucional de la Universidad Icesi ni le genera responsabilidades legales, civiles, penales o de cualquier otra índole, frente a terceros.



Calle 18 #122-135 (Pance), Cali-Colombia  
editorial@icesi.edu.co  
[www.icesi.edu.co/editorial](http://www.icesi.edu.co/editorial)  
Teléfono: +57(2) 555 2334

La serie Bitácoras de la Maestría es una publicación de la Universidad Icesi que tiene como objetivo mejorar la difusión de los trabajos de grado meritorios de sus estudiantes, exponiéndolos a un público más amplio, no necesariamente académico, que pueda aprovecharlos en su cotidianidad. Se trata de “mover” las tesis, desde los anaqueles de las bibliotecas, hacia las manos de los actores de la vida diaria y establecer un vínculo entre autores y potenciales usuarios. En cada volumen se incluyen tres trabajos con temática diversa. Por lo heterogéneo de su contenido, el nombre de cada volumen está compuesto por el nombre de la serie y el de los tres temas que incluye.

## **Ricardo Salazar Cabrera**

Máster en Informática y Telecomunicaciones y Especialista en Gerencia Informática Organizacional de la Universidad Icesi (Cali, Colombia), e Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (Popayán, Colombia). Ha sido docente e investigador en la Universidad del Cauca y en la Fundación Universitaria de Popayán. Sus áreas de énfasis en investigación son: sistemas inteligentes de transporte, Internet de las cosas, sistemas empotrados y sistemas complejos de telecomunicaciones. ricardosalazarcab@gmail.com

## **Álvaro Pachón de la Cruz**

Profesor de tiempo completo y Jefe del Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Icesi (Cali, Colombia). Es Doctor Ingeniero en Telemática y Máster en Ingeniería Telemática de la Universidad de Vigo (España); Especialista en Redes y Comunicaciones de la Universidad del Valle (Cali, Colombia) e Ingeniero de Sistemas de la Universidad Icesi. alvaro@icesi.edu.co

## **William Arleth Cruz López**

Máster en Informática y Telecomunicaciones de la Universidad Icesi e Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (Popayán, Colombia). En el Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones de la Universidad Icesi, se desempeñó como Joven investigador Colciencias y como Asistente de Investigación, en temas relaciones con modelado de canales, motores de juego y métodos de lanzamiento de rayos y radiolocalización. Es Coordinador del Proyecto SLA y QoS en la Empresa de Telecomunicaciones de Popayán. williamcruzlopez@gmail.com

## **Andrés Navarro Cadavid**

Profesor de planta y Director del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones del Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Icesi (Cali, Colombia). Es Doctor Ingeniero en Telecomunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (España) y Máster en Gestión Tecnológica e Ingeniero en Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín, Colombia). Es presidente del capítulo Comunicaciones del IEEE Colombia y miembro de Grupo de Estudio 1 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. [anavarro@icesi.edu.co](mailto:anavarro@icesi.edu.co)

## **Oscar Arley Orozco Sarasti**

Máster en Informática y Telecomunicaciones de la Universidad Icesi (Cali, Colombia) e Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca (Popayán, Colombia). Se desempeñó como Joven Investigador Colciencias en el Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (i2t) de la Universidad Icesi, en temas relacionados con redes vehiculares, sistemas inteligentes de transporte y tecnología aplicada a la agricultura y el medio ambiente. Fue distinguido con el Premio a la Investigación más Novedosa en el marco de la Spring School on Networks 2015 (Chile). [oaorozco@icesi.edu.co](mailto:oaorozco@icesi.edu.co)

## **Gonzalo Llano Ramírez**

Profesor de tiempo completo del departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Icesi (Cali, Colombia). Es Doctor Ingeniero en telecomunicaciones y Máster en Tecnologías de la Información aplicadas a la Educación de la Universidad Politécnica de Valencia (España), Especialista en Gerencia Informática Organizacional e Ingeniero Electricista. [gllano@icesi.edu.co](mailto:gllano@icesi.edu.co)



# Tabla de contenido

<b>Presentación</b> .....	23
<b>Desarrollo de servicios de movilidad basado en una arquitectura de sistemas inteligentes de transporte e Internet de las cosas para ciudades intermedias de países en desarrollo</b> .....	24
<b>Resumen</b> .....	27
<b>Introducción</b> .....	28
<b>Marco teórico</b> .....	31
<b>Ciudad Inteligente</b> .....	31
<b>Movilidad Inteligente</b> .....	32
<b>Sistemas inteligentes de transporte</b> .....	34
<b>Arquitectura ITS</b> .....	37
<b>Tecnologías para implementación de los ITS</b> .....	39
<b>Normatividad y experiencias relevantes</b> .....	44
<b>Normatividad</b> .....	44
<b>Experiencias relevantes</b> .....	49
<b>Diseño del proyecto</b> .....	53
<b>Análisis de brechas: casos revisados vs requerimientos</b> .....	54
<b>Método</b> .....	56
<b>Resultados</b> .....	61

Metodología para desarrollar una arquitectura ITS en una ciudad intermedia de un país en desarrollo .....	61
Popayán: arquitectura ITS según la metodología desarrollada ....	65
Diseño de dos servicios de movilidad inteligente para Popayán ...	68
Propuesta para el desarrollo de servicios de movilidad .....	74
Conclusiones .....	76
Referencias .....	78
<b>Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos</b> .....	<b>85</b>
Resumen .....	87
Introducción .....	88
Marco teórico .....	91
Estado del arte .....	93
RSS .....	94
PDOA .....	94
AOA .....	95
Híbridos .....	95
Trazado de rayos .....	97
Hacia un sistema de localización basado en lanzamiento de rayos ....	98
Descripción de especificaciones y selección de tecnologías .....	98
Herramientas software y hardware .....	99
Definición y diseño del sistema .....	100
Fingerprinting .....	107
Escenarios propuestos .....	107
Simulación del sistema .....	108
Escenario 1: híbrido y simple .....	108

Escenario 2: PDOA .....	110
Escenario 3: sensor AOA de apoyo al sistema de monitoreo .....	112
Modelado de onda .....	115
Validación de la simulación del sistema y revisión final .....	115
Presentación y discusión de resultados .....	116
Escenario 1: híbrido y simple .....	116
Escenario 2: PDOA .....	118
Escenario 3: sensor AOA de apoyo al sistema de monitoreo .....	119
Conclusiones .....	121
Referencias .....	121
<b>Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables climáticas y de gases de efecto invernadero</b> .....	<b>129</b>
Resumen .....	131
Introducción .....	132
Marco teórico .....	135
La agricultura de precisión .....	135
Redes de sensores inalámbricos .....	136
Estado del arte .....	140
Casos de estudio en caña de azúcar y café .....	140
Teledetección y arquitecturas de red .....	141
El proyecto .....	142
Metodología .....	142
Ubicación .....	144
Requerimientos funcionales y no funcionales .....	146
Alcance y arquitectura .....	147
Patrones de diseño del sistema .....	153
Resultados .....	157

Análisis dentro de las cámaras .....	157
Estimación del flujo de gas .....	158
Análisis fuera de las cámaras .....	162
Discusión y conclusiones .....	163
Lecciones aprendidas .....	163
Conclusiones .....	166
Referencias .....	167

# Índice de Tablas

---

## DESARROLLO DE SERVICIOS DE MOVILIDAD BASADO EN UNA ARQUITECTURA DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE E INTERNET DE LAS COSAS PARA CIUDADES INTERMEDIAS DE PAÍSES EN DESARROLLO

---

Tabla 1. Arquitectura para movilidad inteligente propuesta por Hitachi ..	33
Tabla 2. Estructura de un sistema de movilidad inteligente .....	35
Tabla 3. Propuestas de arquitectura IoT .....	42
Tabla 4. Trabajos revisados vs. requerimientos del proyecto respecto de metodologías de diseño de arquitecturas ITS y su aplicación ....	55
Tabla 5. Trabajos revisados vs. requerimientos del proyecto respecto de los procesos de desarrollo de servicios de movilidad basados en una arquitectura ITS .....	55

---

## MÉTODOS AOA, PDOA E HÍBRIDOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN TRANSMISOR NO COLABORATIVO MEDIANTE LANZAMIENTO DE RAYOS SOBRE UN MOTOR DE JUEGOS

---

Tabla 1. Diferencia de potencia entre sensores .....	116
Tabla 2. Distancia entre las posiciones estimada y real .....	117

---

## RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

---

Tabla 1. Propuestas encontradas vs propuesta del proyecto (PY) .....	142
Tabla 2. Requerimientos del producto esperado .....	146

Tabla 3. Elementos utilizados para la construcción de la WSN .....	149
Tabla 4. Valores promedio de GEI al interior de las cámaras y nivel atmosférico .....	158
Tabla 5. Valores de flujo de gas al interior de las cámaras .....	161
Tabla 6. Valores de los sensores promedio de GEI fuera de las cámaras ..	163
Tabla 7. Valores promedio de los GEI evaluados y analizados en el laboratorio .....	164

# Índice de Figuras

---

**DESARROLLO DE SERVICIOS DE MOVILIDAD BASADO EN UNA ARQUITECTURA DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE E INTERNET DE LAS COSAS PARA CIUDADES INTERMEDIAS DE PAÍSES EN DESARROLLO**

---

Figura 1. Enfoque de la investigación .....	31
Figura 2. Temas clave en ciudades inteligentes .....	32
Figura 3. Arquitectura para movilidad inteligente propuesta por Hitachi .....	34
Figura 4. Estructura de un sistema de movilidad inteligente .....	34
Figura 5. Desarrollo, uso y mantenimiento de una arquitectura ITS regional .....	51
Figura 6. FRAME: Metodología de desarrollo de Arquitectura ITS regional .....	51
Figura 7. Metodología utilizada en el proyecto de investigación .....	56
Figura 8. Diagrama de flujo integral de la metodología propuesta .....	58
Figura 9. Arquitectura IoT propuesta .....	59
Figura 10. Arquitectura ITS adaptada a la tecnología IoT .....	60
Figura 11. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 1 .....	62
Figura 12. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 2 .....	63
Figura 13. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 3 .....	63
Figura 14. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 4 .....	64
Figura 15. Vista funcional general de la arquitectura ITS de Popayán .....	67

Figura 16. Vista física general de la arquitectura ITS de Popayán .....	67
Figura 17. Diagrama detallado del servicio PT01 .....	69
Figura 18. Diagrama detallado del servicio TM05 .....	69
Figura 19. Diagrama de diseño específico del servicio PT01 desarrollado utilizando el diagrama detallado y la tecnología seleccionada .....	70
Figura 20. Diagrama de diseño específico del servicio TM05 desarrollado utilizando el diagrama detallado y la tecnología seleccionada .....	70
Figura 21. Circuito obtenido, montado en protoboard .....	71
Figura 22. Circuito operando dentro del vehículo .....	72
Figura 23. Interfaz de la aplicación web: ubicaciones del vehículo registradas .....	74
Figura 24. Interfaz web del usuario operador: alertas de velocidad generadas .....	74

---

**MÉTODOS AOA, PDOA E HÍBRIDOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN TRANSMISOR NO COLABORATIVO MEDIANTE LANZAMIENTO DE RAYOS SOBRE UN MOTOR DE JUEGOS**

---

Figura 1. Diseño general del sistema .....	101
Figura 2. Métodos obtención modelo 3D .....	101
Figura 3. Proceso modelado 3D basado en formato ASCII .....	103
Figura 4. Proceso modelado 3D basado en formato OpenStreetMap .....	103
Figura 5. Modelo 3D gráfico/físico .....	103
Figura 6. Diagrama de flujo para simulaciones en los escenarios .....	109
Figura 7. Escenario híbrido y simple .....	109
Figura 8. Sensor híbrido como transmisor .....	110
Figura 9. Sensores híbrido y sensor de potencia movible .....	110
Figura 10. Sensores de potencia elegidos y transmisor escenario PDOA ..	111
Figura 11. Mallas de receptores a diferentes alturas .....	111



Figura 12. Topología lógica de la WSN .....	153
Figura 13. Esquemático de la topología física de la WSN .....	154
Figura 14. Medición de los valores en el sensor de humedad .....	155
Figura 15. Lógica del sensor de pH .....	156
Figura 16. Cálculo del resistor interno del sensor $R_0$ .....	157
Figura 17. Ejemplo de regresión de datos .....	159
Figura 18. Valores de CO <sub>2</sub> y temperatura en el Lutron GCH-2018 .....	162
Figura 19. Sesgo presentado en las mediciones .....	164

# Acrónimos

---

**DESARROLLO DE SERVICIOS DE MOVILIDAD BASADO EN UNA ARQUITECTURA DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE E INTERNET DE LAS COSAS PARA CIUDADES INTERMEDIAS DE PAÍSES EN DESARROLLO**

---

API	Application Programming Interface
APTS	Advanced Public Transportation System
ARC-IT	Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BS	Base Station
CEN	Comité Europeo de Normalización
DA	Descripción Arquitectónica
ETC	Electronic Toll Collection
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVP	Emergency Vehicles Priority
FRAME	European ITS Framework Architecture
GPS	Global Positioning System
HDC	Highway Data Collection
ICMLCF	Instituto Colombiano de Medicina Legal y Ciencias Forenses
IMDA	Infocomm Media Development Authority
IoT	Internet of Things
IoTA	IoT Architecture
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation System
MinTIC	Ministerio de las Tecnologías de Información y Comunicaciones
Mintransporte	Ministerio de Transporte
OBE	On Board Equipment
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PESTLE	Political, Economic, Social, Technological, Legal and Environmental

PMI	Project Management Institute
SaaS	Software as a Service
SCR	Sistema de Control de Recaudo
SETP	Estratégicos de Transporte Público
SGCF	Sistema de Gestión de Control de Flota
SINNIT	Sistema Inteligente Nacional de Infraestructura, Tránsito y Transporte
SITP	Sistemas Integrados de Transporte Público
TC	Technical Committee
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
TMS	Traffic Management Systems
UTC	Urban Traffic Control
VDC	Vehicle Data Collection
VMS	Variable Message Signs
WSN	Wireless Sensor Networks
www	World Wide Web

---

**MÉTODOS AOA, PDOA E HÍBRIDOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN TRANSMISOR NO COLABORATIVO MEDIANTE LANZAMIENTO DE RAYOS SOBRE UN MOTOR DE JUEGOS**

---

2D / 3D	Dos/Tres Dimensiones
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Quinta Generación
AML	Approximate Maximum Likelihood
ANE	Agencia Nacional del Espectro
AOA	Angle of Arrival
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BSD	Berkeley Software Distribution
CIR	Channel Impulse Response
CRLB	Cramér-Rao Lower Bound
E-112	Enhanced-112
E-911	Enhanced-911
ERE	Espectro Radioeléctrico
FCC	Federal Communications Commission
GPU	Graphics Processor Unit
jME	Java MonkeyEngine
LLS	Least Linear Squares
LOB	Line of Bearing
LOS	Line of Sight
MinTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
ML	Maximum Likelihood

NLOS	Non Line of Sight
NLS	Nonlinear Least Squares
ODE	Open Dynamics Engine
PDOA	Power Difference of Arrival
RSS	Received Signal Strength
SH	Selective Hybrid
SHWA	Selective Hybrid Weighting Algorithm
SOCR	Second Order Cone Relaxation
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UTD	Uniform Theory of Diffraction
VLS	Variance Least Squares
WLLS	Weighted Linear Least Squares
WLS	Weighted Least Squares

---

**RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS  
Y DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

---

AC	Agricultura de Conservación
ACK	Acknowledgement
AP	Agricultura de Precisión
API	Application Programming Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
CPU	Central Processing Unit
DSS	Decision Support Systems
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIS	Geographic Information Systems
GPS	Global Positioning Systems
GWP	Global Warming Potential
IDE	Integrated Development Environment
IPCC	Intergovernmental Panel on Climatic Change
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LED	Light Emitting Diode
LiPo	Lithium Polymer
LOS	Line Of Sight
OSI	Open Systems Interconnection

PAN	Personal Area Networks
PIB	Producto Interno Bruto
RF	Radiofrecuencia
RSSI	Received Signal Strength Indicator
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
WSN	Wireless Sensor Network

# Presentación

Con esta edición la Universidad Icesi inicia la publicación de una serie de libros basados en tesis de maestría meritorias, inicialmente provenientes de la Facultad de Ingeniería. En todos los casos, se trata de publicar, en un formato más dinámico, la información de la investigación realizada para la preparación de dichas tesis, y hacerla llegar a un público más amplio, no necesariamente académico, que pueda darle uso. Dicho de otra manera, se trata de mover las tesis de los anaqueles de las bibliotecas a las manos de los actores de la vida diaria, y establecer un vínculo entre ellos y los egresados de las maestrías.

Cada uno de los volúmenes de esta colección incluye tres tesis. La diversidad de sus temas, propia de la diversidad de aplicaciones que pueden tener estas maestrías, hace que cada volumen sea heterogéneo en su contenido y por ello difícil de resumir en un título. Por lo tanto, cada volumen simplemente indicará en su título frases clave relacionadas con su contenido. Eso explica el nombre tan particular de este primer volumen “Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión”.

Este primer volumen abre con una investigación cuyo propósito es aportar a la solución de los problemas de tráfico y seguridad vial, dos temas comunes a buena parte de las ciudades de hoy. La investigación enfoca su trabajo en ciudades intermedias de países en desarrollo y toma como caso modelo a Popayán, ciudad colombiana localizada al suroccidente del país, que cuenta con 280.000 habitantes (86% de ellos en su zona urbana) en un área de 512 km<sup>2</sup>. La propuesta de los investigadores se enmarca en el concepto de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) y utiliza como tecnología habilitante a la Internet de las Cosas. En el marco de este proyecto: se desarrolló una metodología para el diseño de una arquitectura ITS apropiada para este tipo

de ciudad y se identificó la secuencia requerida para el diseño y desarrollo de servicios de ITS basados en dicha arquitectura. El producto de la investigación se aplicó en Popayán, para la que además se desarrolló y probó uno de los servicios identificados.

El segundo capítulo de este libro está enfocado en las telecomunicaciones, específicamente en las técnicas asociadas con el uso del espectro radioeléctrico, y presenta el desarrollo de una nueva propuesta de localización en redes inalámbricas que reduce la cantidad de sensores involucrados en el proceso de cálculo de la ubicación de un transmisor no colaborativo en entornos exteriores. El desarrollo propuesto está basado en el uso de motores de juegos, como herramienta de simulación, y la técnica de lanzamiento de rayos (*ray launching*), para el modelado del canal. Con la información de modelado de canal se realizó un análisis orientado a la localización de un transmisor no colaborativo en escenarios exteriores; se desarrollan algoritmos de localización AOA (*Angle of Arrival*), PDOA (*Power Difference of Arrival*) e híbridos, y se evaluó su desempeño. Con esta investigación se evidenció que el uso de la técnica de lanzamiento de rayos permite obtener mejores resultados que los métodos tradicionales de modelado de canal para localización con configuraciones híbridas.

El volumen cierra con un trabajo de investigación en agricultura de precisión, realizado en un cultivo orgánico de caña de azúcar localizado en el valle geográfico del río Cauca, en el suroccidente colombiano, zona del país que concentra casi la totalidad de la tierra dedicada a este cultivo y una interesante y variada agroindustria derivada de ella, de la que se obtiene: azúcar, energía, biocombustibles y panela, entre otros. Se trata del diseño de una red de sensores inalámbricos destinada a medir algunas variables climatológicas (humedad e intensidad de la luz solar), el pH del suelo y los niveles de tres gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso), construida a partir de materiales de bajo costo y con tecnología de código abierto. El producto busca contribuir en el uso eficiente de los recursos productivos y en la reducción de la huella de carbono de la actividad agrícola. La implementación de la red no solo hizo posible obtener los resultados esperados, sino que permitió identificar importantes aspectos para mejorar su diseño en futuras implementaciones.

José Ignacio Claros V.  
Editor

# DESARROLLO DE SERVICIOS DE MOVILIDAD BASADO EN UNA ARQUITECTURA DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE E INTERNET DE LAS COSAS PARA CIUDADES INTERMEDIAS DE PAÍSES EN DESARROLLO

Ricardo Salazar Cabrera, MSc.

Álvaro Pachón de la Cruz, Ph.D

## **Citación**

R. Salazar y A. Pachón, “Desarrollo de servicios de movilidad basado en una arquitectura de sistemas inteligentes de transporte e Internet de las cosas para ciudades intermedias de países en desarrollo,” en *Bitácoras de la maestría: vol. 1. Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión*, Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2019, pp. 25-83.



---

## RESUMEN

---

Las ciudades intermedias de los países en desarrollo experimentan problemas con el tráfico y la seguridad vial. Para resolverlos, es común que sus autoridades recurran a la tecnología y desarrollen Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, *Intelligent Transportation Systems*). Los logros de estas iniciativas son escasos porque generalmente su desarrollo no utiliza una arquitectura ITS adecuada: que reúna las mejores prácticas, tenga en cuenta el contexto particular de la ciudad (no solo el problema de tránsito vehicular) y garantice la escalabilidad, interoperabilidad e integración de los servicios desarrollados y de estos con los existentes y con los futuros. En el marco de este proyecto: se desarrolló una metodología para diseño de una arquitectura ITS para una ciudad intermedia de un país en desarrollo; se identificó la secuencia de pasos apropiados para el diseño y desarrollo de servicios de ITS basados en dicha arquitectura, utilizando la Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) como tecnología habilitante; y se realizó su aplicación en Popayán, una ciudad intermedia colombiana, donde además se desarrolló uno de los servicios identificados. El producto de esta investigación constituye una herramienta útil para que las autoridades de esta clase de ciudades puedan desarrollar, de manera organizada y con visión de largo plazo, ITS que mejoren la movilidad y reduzcan la accidentalidad.

## INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tránsito son una de las mayores causas de muerte en el mundo y la mayor en las personas de 15 a 29 años de edad [1]. De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (INMLCF) [2], en Colombia, durante 2017, esta tasa fue de 13.8 por cada 100.000 habitantes, menor que la tasa promedio para las Américas (15.9), pero aún lejana del promedio europeo (9.3). Aunque en 2017 Colombia logró revertir la tendencia al alza en esta tasa –había pasado de 12,76 en 2008 a 14,93 en 2016, con crecimiento año a año–, su valor es aún elevado y corresponde al tercero más alto de los últimos diez años [2].

Para 2016, el INMLCF [3] reportó las tasas de mortalidad en accidentes de tránsito por ciudad, lo que evidenció que los peores números, entre las capitales de departamento, corresponden a ciudades intermedias. Popayán, ciudad objeto de nuestro estudio, obtuvo una tasa de 23.2 por cada 100.000 habitantes, un valor 60% más alto que el promedio nacional, que además duplica con holgura los valores obtenidos por Medellín (11.06), Barranquilla (8.99) y Cartagena (9.77), y supera con suficiencia los de Bucaramanga (14.2) y Cali (17.37), las capitales más pobladas del país. Es claro entonces que los accidentes de tránsito y los efectos negativos asociados a ellos son un problema significativo, tanto a nivel mundial, como nacional y regional, que se agudiza en las ciudades intermedias colombianas.

El efecto del exceso de velocidad en las consecuencias de los accidentes de tránsito ha sido un tema reiterativo en los análisis del INMLCF [2] - [4], su concepto se puede resumir como que el mismo accidente, a mayor velocidad, va a tener peores consecuencias que a menor velocidad. Es por ello que el Instituto reitera, año tras año, la importancia de reducir la velocidad y mejorar su control como bases de una estrategia para la reducción de las tasas de muertos y heridos en accidentes de tránsito.

Al revisar la relación entre muertos y heridos en accidentes de tránsito y su medio de desplazamiento, si bien es claro que viajar en motocicleta o ser peatón tienen los peores registros (49.8 % y 26.5 % de los muertos, 56.4 % y 19.8 % de los heridos, respectivamente [2]), desplazarse en transporte público colectivo (bus, buseta, microbús) merece especial atención: aunque a nivel global su participación en ambos ítems (2.6% y 7.8%, respectivamente [2]) es consistente con el tamaño de su participación en el parque automotor (5%) [4],

el detalle, cuando las estadísticas se refieren solo a pasajeros, gana significancia, pues su participación en muertos y heridos aumenta al 13.6 % de los muertos y el 27.7 % de los heridos [2], dos valores que aunque son consistentes con su modelo de ocupación (un conductor, muchos pasajeros), es alto y explica por qué es necesario intervenir sobre este medio de desplazamiento.

Además de la accidentalidad, las ciudades del mundo enfrentan importantes retos de movilidad. Y esto es válido también para las ciudades colombianas. En el Inrix Global Traffic Score Card 2018 [5], Bogotá aparece en el puesto tres del ranking de las 25 ciudades más congestionadas del mundo, solo “superada” por Moscú (Rusia) y Estambul (Turquía). De acuerdo con este informe, en la capital colombiana se pierden 272 horas año durante los picos de congestión de tráfico (la medida compara el tiempo usado para cubrir un trayecto durante la hora pico, versus el tiempo usado en horario normal) y se alcanza una velocidad promedio de 7 millas por hora. Medellín, sin bien tiene números mejores, forma parte también de este Top 25 (puesto 25) [5]. En el año inmediatamente anterior, el Top 100 de este mismo índice incluía a Bogotá, Medellín y Cali, en los puestos 6, 18 y 30, respectivamente, e incluía a Pasto, Villavicencio, Barranquilla, Neiva y Santa Marta como ciudades con niveles de congestión importantes [6].

Los problemas de alto tráfico en las ciudades tienen diversas causas. Mientras el tráfico recurrente obedece al exceso de vehículos, la limitación en la capacidad física y la operación de las redes (como por ejemplo las señales de tránsito), el tráfico no recurrente tiene como causas principales los accidentes de tránsito, los inconvenientes en la operación de los vehículos, los chequeos policiales, los cierres temporales de vías, los eventos especiales y el clima adverso [7]. Como se puede deducir de lo anterior, al atacar los accidentes de tránsito se ataca a una de las causas principales de los problemas del tráfico no recurrente; para el tráfico recurrente, atacar causas como el exceso de vehículos y la limitación de capacidad física es poco viable en el contexto del proyecto de investigación, mientras que la operación de las redes, a través de servicios de mejoramiento de gestión de tráfico, es viable.

En los ámbitos nacional e internacional, buscando una solución para los problemas de seguridad vial y alta congestión, se han desarrollado servicios de movilidad inteligente, sin embargo, como se evidencia en la sección *Normatividad y experiencias relevantes* de este documento, muy pocos han sido desarrollados con base en una arquitectura de referencia adecuada, como puede llegar a

ser la de un Sistema Inteligente de Transporte (ITS, *Intelligent Transportation System*). Los ITS se definen como la aplicación de tecnologías avanzadas de sensores, computadoras, electrónica, comunicaciones y estrategias de gestión para mejorar la seguridad y eficiencia del sistema de transporte terrestre. La arquitectura de los ITS, al igual que para cualquier sistema, es fundamental para su descripción y entendimiento con sus actores.

Los servicios de movilidad inteligente en el campo de los ITS que pueden aportar a la solución de los problemas mencionados en las ciudades intermedias de países en desarrollo, como Colombia, son los de: prevención en el vehículo, información al viajero, redes vehiculares, seguimiento y control a los vehículos, gestión de tráfico y control de luces de tránsito. Como la idea es evitar los accidentes, no se incluyen los servicios de manejo de emergencias, pues su utilidad es alta pero está limitada a la atención del suceso cuando se presenta.

Para determinar los servicios inteligentes en movilidad prioritarios para solucionar los problemas identificados, se consideró conveniente tener en cuenta los hechos encontrados acerca de las causas de los accidentes de tránsito en el país y el tipo de vehículos en los que mayor impacto tendría la implementación de un servicio de éste tipo. El control y seguimiento al vehículo de tipo transporte público, gestionando principalmente su velocidad máxima y recorrido, se considera un servicio prioritario, capaz de ayudar en la solución de problemas de accidentalidad y de tráfico sin necesidad de una alta inversión económica. La gestión de tráfico y la información al viajero, son otros servicios que podrían ayudar en la reducción de la congestión vehicular sin una inversión demasiado alta, como si se requeriría, por ejemplo, en el caso de servicios de redes vehiculares.

En la implementación de dichos servicios es muy importante considerar el uso de estándares adecuados –como son las arquitecturas de ITS– y el contexto particular (político, económico, social, etc.) de una ciudad intermedia de un país en desarrollo, con el fin de lograr la interoperabilidad y la integración de los servicios que se desarrollen, tanto a nivel de movilidad, como a nivel de servicios en general de una ciudad inteligente. En la investigación realizada se encontró que éste aspecto, el proceso de desarrollo de servicios de movilidad, siguiendo estándares adecuados y teniendo en cuenta el contexto, es un punto que no se considera adecuadamente en nuestro país (ver la sección *Normatividad y experiencias relevantes*) y en general en los países en desarrollo, por ello es el enfoque principal de esta investigación.

Para concluir, cabe precisar que el diseño y desarrollo de servicios de movilidad para las ciudades intermedias que se realizó en esta investigación busca ser solo un ejemplo de aplicación de los resultados obtenidos en la investigación para validar su utilidad. Los servicios diseñados y el prototipo de servicio desarrollado no son el objetivo principal de la investigación ni se pretende afirmar que dicho prototipo pueda ser implementado tal cual en la ciudad, pues ello requeriría estudios adicionales y pruebas mucho más exhaustivas. Un resumen de lo planteado en esta introducción se presenta en la FIGURA 1

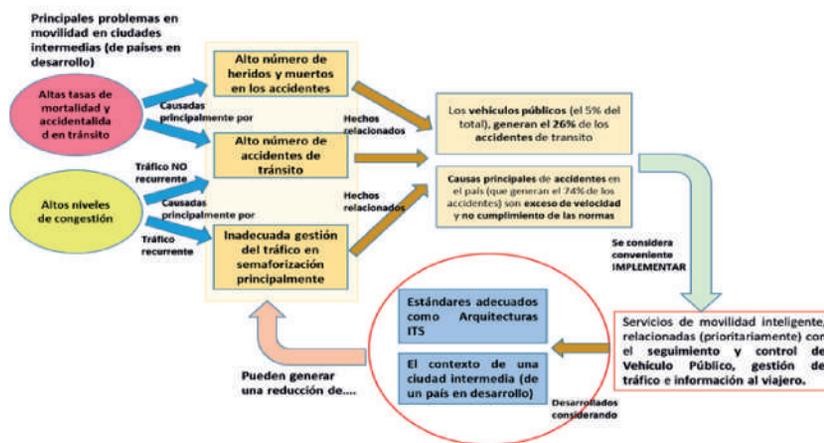


Figura 1. Enfoque de la investigación

## MARCO TEÓRICO

### CIUDAD INTELIGENTE

La rápida tendencia a la urbanización de los últimos años permite predecir estadísticamente que para 2050 el 70% de la población vivirá en zonas urbanas, lo que invertiría las cifras de 1950, cuando el 70% de la población vivía en el área rural [8]. Esta tendencia presenta mayor rapidez en países con bajos ingresos [8] y va acompañada de incrementos sin precedente en el consumo de agua, tierra, materiales de construcción y comida, y deficiencias en la gestión de desechos. Por lo anterior, las ciudades están constantemente bajo presión para ofrecer servicios de mejor calidad, promover la competitividad, mejorar

la prestación de servicios, aumentar la eficiencia, eficacia y productividad, y reducir los costos, lo que motiva a las ciudades a recurrir a soluciones “inteligentes” y a experimentar con diversas aplicaciones de infraestructura inteligente [8].

Una revisión de las definiciones, dimensiones y conceptos sobre este particular [8]-[14] permite formular la siguiente definición: una ciudad inteligente es aquella que utiliza varios medios, entre ellos las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), para mejorar: la eficiencia en sus procesos administrativos, su infraestructura crítica, su movilidad, la calidad de vida de sus ciudadanos y el ambiente, buscando el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles. Las ciudades inteligentes manejan seis grandes temas clave: movilidad (*smart mobility*); economía (*smart economy*); vida (*smart living*); gobierno (*smart governance*); gente (*smart people*); y ambiente (*smart environment*), como se ilustra en la FIGURA 2.

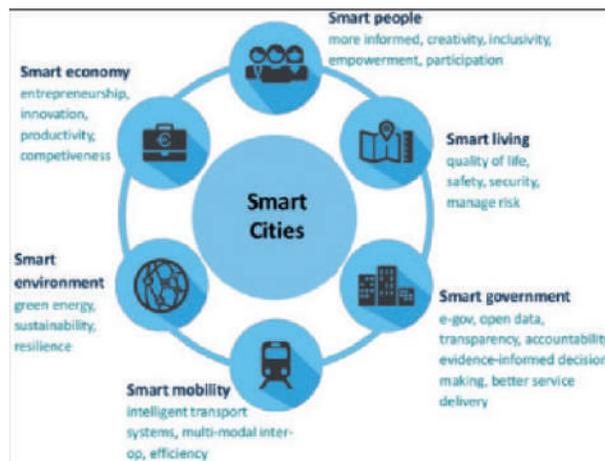


Figura 2. Temas clave en ciudades inteligentes [8 ]

## MOVILIDAD INTELIGENTE

El transporte produce varios impactos negativos severos y genera problemas que afectan la calidad de vida en las ciudades, tales como la contaminación, la congestión y los largos tiempos de desplazamiento. La movilidad inteligente es un tema prometedor en ciudades inteligentes porque tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de sus habitantes, sus objetivos son: reducir la

contaminación, la congestión de tráfico, la contaminación acústica y los costos del transporte; incrementar la seguridad de las personas; y mejorar la velocidad en el transporte [11].

Para lograr estos objetivos se debe analizar la demanda de movilidad, ella es muy variable en el tiempo y genera una disparidad continua entre el nivel de oferta y demanda de servicios. Así, las ciudades deben considerar la demanda máxima de viajes –del transporte público y del particular–, y los diferentes medios de transporte utilizados, para calcular la infraestructura y los servicios requeridos, pero deben tener en cuenta también que cada noche la demanda se desploma y se presenta un enorme exceso en la capacidad disponible. Este flujo dinámico en los sistemas de movilidad, entre lo que quiere el ciudadano –una infraestructura y servicios adecuados, inclusive para los momentos de mayor demanda– y lo que le conviene a la sociedad –una infraestructura adecuada, considerando costos de operación, medios de transporte adecuados y periodos de uso, entre otros–, plantea a los gobiernos municipales un reto constante de eficiencia operativa y demanda de viajes personales, que han tratado de resolver a través del uso de nuevas tecnologías y servicios basados en información del sector de la movilidad [10]. Este balance entre lo que quiere el ciudadano y lo que le conviene a la sociedad se constituye en un punto clave que debe lograr la movilidad inteligente con ayuda de los proveedores de tecnología relacionados con la movilidad. En ese sentido –específicamente para el transporte público–, Hitachi [10] propone una arquitectura de cinco capas, como se presenta en la TABLA 1 y en la FIGURA 3.

**Tabla 1. Arquitectura para movilidad inteligente propuesta por Hitachi [10]**

Capa de...	Detalle
Experiencia del usuario de transporte	En ella, los usuarios reciben el transporte requerido, la información y otros servicios de las compañías de transporte cuando viajan de un lugar a otro.
Servicios de transporte	Dominio de empresas de transporte, en ella las empresas suministran servicios a los usuarios.
Recolección de información	Dominio de las empresas de transporte, en ella se recopila información de uso (e.g, cómo los usuarios utilizan los servicios suministrados por las empresas de transporte).
Control y gestión de la información	Dominio de las empresas de transporte, en ella, como indica su nombre, se controla y gestiona la información para que las compañías de transporte presten sus servicios
Coordinación de compañías de transporte.	En ella se recopila y analiza información de todas las empresas de transporte y se proporciona información para guiar la operación, el control y otras funciones de la empresa.

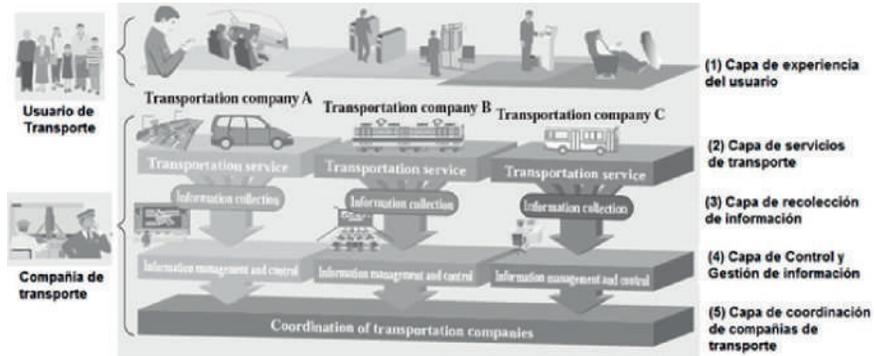


Figura 3. Arquitectura para movilidad inteligente propuesta por Hitachi [10]

De acuerdo con Busher, Doody, Webb y Aoun [15], un sistema de movilidad inteligente también se puede concebir como un grupo de capas que dependen y agregan valor a las que se encuentran en un nivel inferior y superior (FIGURA 4). Las capas del sistema de movilidad inteligente propuesto por ellos se detallan en la TABLA 2.

Benevolo, Dameri y Auria [11] clasifican las iniciativas de movilidad inteligente dependiendo de sus actores, así:

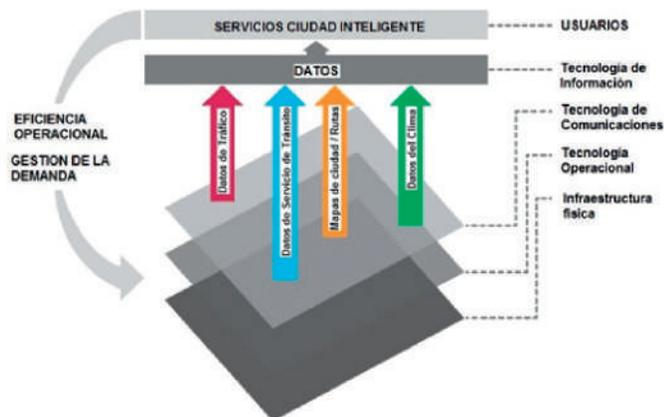


Figura 4. Estructura de un sistema de movilidad inteligente según Busher et al. [15]

**Tabla 2. Estructura de un sistema de movilidad inteligente según Buser et al. [15]**

Capa	Detalle
Infraestructura física	Sustento de todo el sistema, constituida por los caminos, ferrocarriles, vías para bicicletas, senderos y otros activos físicos que permiten el transporte para operar.
Tecnología operacional	Generadora de los datos, la materia prima necesaria para las soluciones inteligentes, permite la recolección y comunicación en tiempo real de datos brutos de la infraestructura.
Tecnología de comunicaciones	Los canales WiFi, 3G, 4G y Bluetooth son fundamentales para la comunicación en tiempo real de datos y entre operadores humanos, procesadores de datos y consumidores de información.
Tecnología de la información	Los datos son recopilados y agregados por actores de los sectores público y privado involucrados en el procesamiento de datos, la anonimización, el análisis, la modelación contextual, la simulación y la programación de software.

- Empresas y organizaciones de transporte público, grupo que incluye todas las iniciativas llevadas a cabo por empresas u organizaciones que prestan servicios de transporte público local en la ciudad y pretenden cambiar positivamente la calidad del transporte público, lo que implica, entre otros: cambios en la flota de vehículos de transporte y combustibles (e.g., adopción de vehículos eléctricos, vehículos EUR 5, vehículos automóviles o vehículos de GNC).
- Empresas privadas y ciudadanos, grupo que considera las iniciativas llevadas a cabo por particulares y empresas –generalmente apoyadas y estimuladas por políticas públicas–, e incluye una serie de intervenciones como la introducción de vehículos con ciertas características y acciones sobre modos de transporte que afectan el comportamiento de los ciudadanos, tales como el uso de autos híbridos y vehículos compartidos.
- Organismos públicos y gobiernos locales, grupo que incluye los subgrupos de infraestructura y políticas de apoyo a la movilidad inteligente, el primero con proyectos como la creación de carriles para bicicletas o intervenciones destinadas a cambiar la movilidad como la creación de zonas de tráfico restringido, el segundo, representado por una serie de políticas integradas que se pueden implementar para cambiar el sistema de movilidad, tales como los incentivos para el uso de combustibles menos contaminantes.
- La combinación de los anteriores, grupo que se da cuando se realizan iniciativas integradas, como los ITS; sus acciones corresponden a un gran número de soluciones de movilidad inteligente caracterizadas por

una intensidad media-alta de uso de las TIC. Los ITS, por ejemplo, son aplicaciones avanzadas que recopilan, almacenan y procesan datos, información y conocimiento con el objetivo de planificar, implementar y evaluar iniciativas integradas, son un conjunto grande y heterogéneo de aplicaciones, incluyendo: sistemas de control de la demanda para el acceso a áreas reservadas; sistemas de guía de parqueo integrado; señales de mensaje variable (VMS, *Variable Message Signs*); control de tráfico urbano (UTC, *Urban Traffic Control*); sistemas de video vigilancia para la seguridad del área y del medio ambiente; sistemas integrados de gestión para la movilidad; sistemas de recogida de datos de tráfico; y sistemas expertos para la correlación y filtrado de eventos.

### **SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

Como se indicó, los ITS son una de las iniciativas de movilidad inteligente que se materializa cuando todos los actores relacionados con la movilidad de la ciudad se integran para determinar las soluciones que se requieren en este campo, pueden considerarse también como la implementación de tecnologías asociadas con las actividades propias del sector de transporte, tales como la localización y la organización de flotas de vehículos, el diseño de rutas, la semaforización, la creación de vehículos inteligentes y la construcción de carreteras inteligentes. La aplicación de las TIC en este sector, en términos de infraestructura y operación, se constituye en un elemento diferenciador que permite: entre otras, establecer comunicaciones más ágiles, disminuir la congestión del tráfico, reducir el tiempo normal utilizado por un viajero en sus traslados y aumentar la seguridad vial, mejorando así la eficiencia, competitividad y productividad de la ciudad [16].

Los ITS se pueden clasificar según la funcionalidad que prestan al sector transporte en aplicaciones de seguridad (prevención de accidentes, gestión de accidentes, notificación de señales de tránsito), de eficiencia (gestión de tráfico, monitoreo de las vías) y de confort (información, entretenimiento) [16].

Como se mencionó, los ITS consideran los requerimientos de gran variedad de actores en una ciudad, por lo tanto, cuando se evalúa su diseño y desarrollo, las ciudades deben buscar una integración basada en estándares que permitan agregar datos de una amplia variedad de sistemas de captura de datos de tráfico y transporte, lo que implica múltiples tipos de dispositivos y de proveedores. Centralizar el acceso a los datos relacionados con el tráfico, junto con la

capacidad de analizar patrones de tráfico históricos y datos en tiempo real, brinda a las ciudades la oportunidad, no sólo de mejorar la congestión del tráfico en el corto plazo, sino de establecer metas a largo plazo. Disponiendo de informes que monitoreen el desempeño y los patrones de tráfico a lo largo del tiempo, las ciudades pueden lograr progresos significativos en la reducción de la congestión, las emisiones y el ruido [17].

Para poder realizar la integración mencionada es muy importante que los servicios y sistemas de movilidad desarrollados en la ciudad estén basados en una arquitectura ITS de referencia, que garantice un lenguaje común entre todos los actores y permita su interoperabilidad sin mayores costos o complejidad técnica.

## ARQUITECTURA ITS

### ARQUITECTURA DE SISTEMAS EN GENERAL

Un sistema es un grupo de componentes organizados para cumplir una función o un grupo de funciones específicas. Un sistema se encuentra inmerso en un ambiente o contexto que puede influenciarlo porque determina las circunstancias de su desarrollo y las influencias políticas y operacionales que recaen sobre él. Un sistema tiene uno o más interesados (*stakeholders*) quienes tienen algún asunto, preocupación (*concern*) o relación respecto de dicho sistema [18].

Cada sistema tiene una arquitectura que puede ser registrada por una Descripción Arquitectónica (DA), la cual se organiza en una o más vistas del sistema. La vista es una representación de un sistema completo desde la perspectiva de un grupo de *concerns* de uno o más *stakeholders*.

En resumen, una vista es un modo de ver la arquitectura. Las vistas no son ortogonales, pero generalmente cada una tiene nueva información. Un punto de vista (*point of view*) establece las convenciones por las cuales se crea, describe y analiza una vista.

De esa manera, una vista se ajusta a un punto de vista. Algunos puntos de vista comunes son: el comportamental, qué hace el sistema; el físico o estructural, cómo está organizado el sistema; el de gestión y datos o lógica, cuáles son las relaciones entre los datos manejados [18]. Para el diseño de la arquitectura de un sistema, se recomienda la revisión de estándares internacionales, como el ISO/IEC/IEEE 42010 [19].

## ARQUITECTURA ESPECÍFICA PARA UN ITS

Al igual que otros sistemas altamente complejos, los ITS necesitan un marco estratégico o arquitectura del sistema como base, tanto para la toma de decisiones relativas a su diseño e implementación, como para las toma de decisiones de inversión. Una arquitectura ITS debe cubrir aspectos técnicos y cuestiones organizativas, legales y empresariales; la capacidad de integrar sistemas de esta manera aumenta enormemente su potencial [20].

Una arquitectura ITS es una arquitectura de sistemas creada para el dominio ITS. Se compone de varias descripciones del sistema, cada una concentrada en un conjunto específico de características (puntos de vista), que juntos conforman una descripción completa del ITS. Aunque no existe un conjunto definido de puntos de vista que deba existir, un conjunto típico incluirá [20]: el punto de vista de los stakeholders, a menudo llamado necesidades de las partes interesadas o necesidades del usuario, que incluye la lista de todas las funciones y características que proporcionará el ITS; la descripción o modelo conceptual, que proporciona una descripción de nivel superior de cómo todo funciona en conjunto; el punto de vista funcional o lógico, que muestra los procesos y datos que se requieren, y el flujo de datos alrededor del ITS; el punto de vista físico que muestra dónde se ubicarán los procesos; y el punto de vista de comunicaciones, que muestra las rutas de comunicación que se necesitarán para pasar datos entre las ubicaciones físicas.

La ISO 14813-5:2010 [21] es una referencia internacional que entrega los requerimientos para la descripción y documentación de la arquitectura de los ITS, entre ellos: la descripción de la arquitectura, que debe detallar la misión y la visión por alcanzar al aplicar el estándar y una descripción de los aspectos arquitecturales del estándar; la descripción de los servicios, que debe incluir dominios del servicio ITS, grupos de servicio y servicios; y la descripción de los elementos de la arquitectura, esto es: su alcance, que debe definirse por los dominios, grupos o servicios que incluye la arquitectura; la descripción o definición del sistema, incluyendo los esquemáticos que facilitan su entendimiento; las descripción o definición de protocolos, que de ser requeridos se deben escribir en lenguajes formales como SDL, XML; y la descripción/definición de los datos.

Según la ISO 14813-5:2010 [21], las arquitecturas ITS deben tener una arquitectura conceptual que provea una descripción operacional general e

incorpore conceptos organizacionales y requerimientos de usuario, junto con el conocimiento requerido para su interoperabilidad con otros sistemas. Debe incluir además uno o más dominios de servicio, los respectivos grupos de servicio y los servicios, la arquitectura lógica o funcional, que debe describir la naturaleza del sistema basado en la información, el control o las funciones y sus relaciones, y opcionalmente: la arquitectura física, de comunicaciones y organizacional.

## TECNOLOGÍAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE LOS ITS

La Internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT) se encuentra lista para renovar casi todas las industrias, incluso el sector del transporte. A medida que más y más ciudades adoptan la revolución de la ciudad inteligente, los gobiernos y expertos en tecnología van descubriendo formas de mejorar la calidad de vida en estos hábitats dinámicos, incluida la adopción de sistemas de transporte inteligentes. La IoT permite la integración de la comunicación, el control y el procesamiento de la información en los sistemas de transporte, y ellos a su vez, interacciones dinámicas en tiempo real [22].

La IoT en el sistema de transporte inteligente no solo está siendo ampliamente aprovechado para la administración del tráfico y las soluciones de estacionamiento inteligente, sino también para gestión de flotas, soluciones telemáticas, entretenimiento de pasajeros y soluciones de seguridad. Además, la IoT ayuda a mejorar los sistemas de gestión del transporte, lo que incluye la gestión de soluciones de red y la recaudación electrónica de peajes [22]. Algunos proyectos de ITS han sido implementados usando IoT [23] - [25] y otros con tecnologías relacionadas, como redes de sensores [26] y *big data*. A continuación se presenta brevemente cada una de ellas.

### REDES DE SENSORES (WSN)

El concepto de *Wireless Sensor Networks* (WSN) se basa en una serie de pequeños dispositivos electrónicos que tienen acceso al mundo exterior por medio de sensores [27]. Generalmente están compuestas por dispositivos pequeños y de bajo costo que se comunican de forma inalámbrica y tienen la capacidad de procesar, detectar y almacenar. Los nodos se comunican de forma inalámbrica y con frecuencia se auto-organizan después de ser implementados de forma *ad-hoc*. Es una infraestructura compuesta por elementos de detección (medición), computación y comunicación que le da al usuario la capacidad de instrumentar, observar y reaccionar ante eventos y fenómenos en un entorno específico [26].

Algunos proyectos, como el de Vivek, Prashant y Norattam [26] utilizan estas WSN para desarrollar servicios de ITS, como por ejemplo la detección de vehículos en las vías por parte de otros vehículos para evitar accidentes, cuando la línea de vista para el conductor está obstruida. Vivek et al., utilizan estaciones base (BS, *Base Station*) ubicadas en puntos estratégicos de la carretera a las cuales se conectan dispositivos Bluetooth ubicados en los vehículos para obtener información sobre condiciones del tráfico en las vías contiguas a un cruce y así evitar accidentes. Las WSN, sin embargo, han sido utilizadas en escenarios disímiles como la atención médica, la agricultura, el monitoreo del entorno y la medición inteligente

En las WSN existe una alta heterogeneidad porque hay muchas soluciones –propietarias y no propietarias–. La tendencia actual es a alejarse de los estándares propietarios y cerrados y adoptar redes de sensores basadas en IP, que permitan la conectividad entre las WSN e Internet, y que así los objetos inteligentes participen en la IoT. Sin embargo, debido a las redes implementadas previamente, la migración a redes abiertas se hace un poco compleja [28].

Según Mainetti, Patrono y Vilei [28], la tendencia de las WSN es hacia redes abiertas que permitan la conectividad con Internet, por lo que es conveniente utilizar IoT (en lugar de sólo WSN) para la implementación de la ITS a realizar. La IoT se considera como la evolución natural de las WSN, al implementar redes de sensores abiertas con acceso a Internet (es relevante mencionar que en Popayán no existen redes WSN instaladas previamente, útiles para la implementación ITS, por lo cual no se requiere de una integración al respecto).

### **INTERNET DE LAS COSAS (IoT)**

La IoT es un paradigma de comunicación reciente que prevé un futuro cercano donde los objetos de la vida cotidiana estén equipados con microcontroladores, transceptores para comunicación digital y conjuntos de protocolos adecuados que les permitan comunicarse entre sí y con los usuarios, convirtiéndose en una parte integral de la Internet. El concepto tiene como objetivos: hacer aún más inmersiva y omnipresente la Internet; facilitar el acceso y la interacción con una amplia variedad de dispositivos (electrodomésticos, cámaras de vigilancia, sensores de monitoreo, actuadores, pantallas, vehículos, etc.); y fomentar el desarrollo de una serie de aplicaciones que usan una cantidad potencialmente enorme y variada de datos generados por tales objetos, para proporcionar nuevos servicios a los ciudadanos, las empresas y la administración pública [29].

A la gran cantidad de servicios para ciudades inteligentes que se pueden implementar a través de IoT (salud estructural de edificios, gestión de residuos, gestión de tráfico, parqueo inteligente, etc.) se le denomina IoT Urbana (*Urban IoT*). Su capacidad de integrar diferentes tecnologías con las infraestructuras de comunicación existentes, apoyando así una evolución progresiva de la IoT, con la interconexión de otros dispositivos y la realización de nuevas funcionalidades y servicios, es una característica principal de las infraestructuras *Urban IoT*.

Como se dijo, la IoT conecta objetos equipados con una unidad de comunicación y varios sensores a Internet, para lograr: el intercambio de información, la identificación, el posicionamiento, el monitoreo y la gestión. La IoT se puede dividir lógicamente en capas de percepción, red, servicio y aplicación. La capa de percepción detecta y recopila datos, la capa de red permite la conectividad entre los diferentes elementos que utilizan la tecnología de Internet, mientras que la capa de servicio ofrece servicios a la capa de aplicación o un usuario final para efectuar un procesamiento inteligente adicional. Esa sólida visión de IoT agrega nuevas dimensiones a los ITS, por lo que se espera lograr un alto impacto en las aplicaciones y servicios [30].

Un gran número de servicios ITS requiere recopilar información de dispositivos ubicados principalmente en las vías o en los vehículos que las transitan, y enviarlos a un lugar de almacenamiento centralizado a través de algún tipo de red de comunicaciones que involucra normalmente Internet. Por ello, la IoT es bastante útil para la implementación de servicios ITS. En proyectos a nivel mundial se ha utilizado la IoT en servicios ITS para solucionar algunos inconvenientes comunes, como el seguimiento y control de vehículos públicos [23] y la ubicación de espacios de parqueo disponibles y el proceso relacionado con el ingreso y pago [24].

El gran crecimiento del uso de la IoT en los últimos años permite preverle un futuro prometedor. Eso, sumado a que las implementaciones sobre ITS utilizando IoT han mostrado muy buenos resultados, se considera conveniente su uso en la implementación de un Sistema ITS. La TABLA 3 presenta una descripción de las arquitecturas IoT consideradas de mayor relevancia.

## **BIG DATA**

Este concepto representa un nuevo paradigma tecnológico para los datos que se generan a alta velocidad, en alto volumen y con alta variedad. *Big data* se

**Tabla 3. Propuestas de arquitectura IoT**

Propuesta	Detalle
IoTA [31]	Su propuesta contiene siete grupos de funcionalidad longitudinales (de abajo hacia arriba: dispositivos, comunicación, organización del servicio, gestión del proceso IoT, entidad virtual, servicio IoT y aplicación), complementado por dos grupos de funcionalidad transversal (gestión y seguridad), los cuales proporcionan funcionalidades requeridas por cada uno de los grupos longitudinales.
Bahga y Madiseti [32]	Proponen una arquitectura IoT basada en la arquitectura IoT-A, cuya importancia radica en que simplifica, en cuanto a componentes y capas, la propuesta del IoT-A, manteniendo sus componentes principales.
IMDA [33]	La propuesta de la Infocomm Media Development Authority (IMDA) del gobierno de Singapur tiene: una primera capa compuesta por objetos inteligentes integrados con sensores que permiten la interconexión de los mundos físico y digital y logran que la información sea recolectada y procesada en tiempo real; una segunda capa de gateways y redes, que provee la infraestructura de red cableada o inalámbrica robusta y de alto rendimiento como medio de transporte para el volumen de datos masivo que producirán los sensores; una tercera capa de servicios de gestión, que posibilita el procesamiento de la información a través de análisis, controles de seguridad, modelado de procesos y administración de dispositivos; y una capa de aplicación, que incluye diversas aplicaciones de sectores industriales que pueden aprovechar la IoT.
WSO2 [34]	Su propuesta consiste en un conjunto de capas, cada una con una función clara. Las capas pueden ser instanciadas por tecnologías específicas. Las capas horizontales de la arquitectura son: dispositivos, comunicaciones de dispositivos, capa de bus/agregación, procesamiento y análisis de eventos, comunicaciones externas, portal Web, tablero y API (Application Programming Interface); las capas transversales son: gestor de dispositivos y gestión de identidad y acceso (muy similares a las capas transversales de la propuesta de IoT-A).
Cisco [35]	Arquitectura de siete capas, cada una con una funcionalidad específica, las seis primeras similares a las de otros modelos: Dispositivos físicos y controladores; Conectividad (unidades de procesamiento y comunicación); Borde computacional (elemento de datos de análisis y transformación); Acumulación de datos (almacenamiento); Abstracción de datos (agregación y acceso); Aplicación (reporte, analítica y control); y Colaboración y procesos (participación de personas y procesos de negocio), que interactúa con la capa de aplicación.
Genérica [36]	Zhanlin-Ji, Ganchev y O'Droma identifican que cuando hay múltiples aplicaciones de IoT basadas en arquitecturas diferentes, se presentan inconvenientes en la construcción, convergencia y apertura de las IoT, por ello, para reducir las inversiones en esta área, recomiendan seguir unos principios arquitectónicos para unificar el diseño a través de una arquitectura genérica de IoT de alto nivel, adecuada para la creación de ciudades inteligentes.

concibe como un elemento de cambio capaz de revolucionar la forma en que las empresas operan en muchas industrias [37]. Desde 2001, el concepto de *big data* se ha concebido con tres dimensiones que ayudan a entenderlo, denominado 3V: volumen, la cantidad de datos que se generan; velocidad, la frecuencia con la que se generan y procesan los datos; y variedad, el número de tipos de datos. Algunas empresas tecnológicas han adicionado otras dimensiones como: veracidad, variabilidad, complejidad y valor [38].

Lee [38] indica que desde el advenimiento de la *World Wide Web* (www), *Big Data* y el análisis de datos han evolucionado a través de tres etapas principales. La primera (1994 – 2004), denominada Big Data 1.0, coincide con el advenimiento del comercio electrónico, durante ella, las empresas *online* fueron los principales contribuyentes del contenido web, mientras que el contenido generado por el usuario era marginal debido a la limitación técnica de las aplicaciones web; en esta etapa se desarrollaron técnicas de minería Web para analizar las actividades en línea de los usuarios. La segunda etapa (2004 – 2014), denominada Big Data 2.0, está impulsada por la Web 2.0 y el fenómeno de las redes sociales y se refiere a un paradigma web que evolucionó y le permitió a los usuarios interactuar con sitios web y aportarles su propio contenido; la analítica de medios sociales apoya las actividades de minería de contenido de redes sociales, minería de uso y estructura de minería, analiza e interpreta los comportamientos humanos en los sitios de medios sociales, proporciona información y saca conclusiones acerca de los intereses de los consumidores, y sus patrones de navegación web, listas de amigos, sentimientos, profesión y opiniones. La tercera etapa (a partir de 2015), denominada Big Data 3.0, abarca datos de Big Data 1.0 y Big Data 2.0, sus principales contribuyentes son las aplicaciones de IoT, las cuales generan datos en forma de imágenes, audio y video.

La IoT se refiere a un entorno tecnológico en el que los dispositivos y los sensores tienen identificadores únicos con la capacidad de compartir datos y colaborar a través de Internet, incluso sin intervención humana, con su rápido crecimiento, los dispositivos y sensores conectados superarán a los sitios web de comercio electrónico y a las redes sociales como las principales fuentes de *big data*. Para muchas aplicaciones de IoT, una mayor proporción del análisis se realiza a través de los sensores en la fuente de recolección de datos. Esta tendencia está conduciendo a un nuevo campo, el análisis de transmisión, el cual extrae información de los datos que se transmiten; a diferencia de los

análisis de redes sociales, en donde se analizan datos almacenados, los análisis de transmisión implican un análisis de eventos en tiempo real para descubrir patrones de interés a medida que se recopilan o generan datos. Los análisis de transmisión se utilizan, no solo para monitorear las condiciones existentes, sino también para predecir eventos futuros [38].

Las soluciones IoT, como por ejemplo la implementación de servicios ITS, requieren almacenar una gran cantidad de datos, debido a que cada uno de los dispositivos sensoriales (*sensing*) ubicado en carreteras y vehículos envía datos continuamente, incluso varias veces por segundo durante todo el día, todos los días del año. El volumen de datos puede llegar a ser alto, dependiente de la cantidad de dispositivos; la velocidad también puede ser alta, teniendo en cuenta que en algunos casos (como por ejemplo en los servicios de localización o seguimiento) se requiere el envío de la posición o la velocidad en pocos segundos; y la variedad también puede llegar a ser un factor importante, cuando se tienen varios servicios de movilidad operando o cuando la información es provista por diferentes entidades.

Los servicios de movilidad inteligente utilizando tecnología IoT requieren de *big data* en la medida en que se va incrementando su alcance. En dichos casos, la analítica de la información transmitida *online* es útil para intentar predecir eventos futuros –como por ejemplo, la hora de llegada aproximada desde un origen a un destino o el nivel de tráfico que se presentará en cierta ruta en determinado momento–, o en aplicaciones avanzadas –como por ejemplo para determinar cuándo existe un alto riesgo de accidente de tránsito, en cierta ruta a cierta hora del día–.

## **NORMATIVIDAD Y EXPERIENCIAS RELEVANTES**

### **NORMATIVIDAD**

En el mundo desarrollado se han logrado importantes avances en el diseño y la implementación de servicios de movilidad basados en ITS, los Estados Unidos [39], la Unión Europea [40], Japón [41] y Malasia [42] son muestra de ello. Las arquitecturas formulados en él, se han constituido en el punto de partida para que las entidades de estandarización generen normas relacionadas con arquitecturas ITS. Es el caso del Technical Committee (TC) 204 de la International Organization for Standardization (ISO); el TC 208

del Comité Europeo de Normalización (CEN); y el TC ITS del European Telecommunications Standards Institute (ETSI).

El ISO TC 204 tiene como foco la estandarización de los sistemas de información, comunicación y control en el ámbito del transporte terrestre urbano y rural, incluidos sus aspectos intermodales y multimodales, información al viajero, gestión del tráfico, transporte público, transporte comercial, servicios de emergencia y servicios comerciales en los sistemas inteligentes de transporte [43]. El CEN TC 208 es responsable de gestionar la preparación de estándares en el campo de los ITS en Europa y sirve como plataforma para que las partes interesadas europeas intercambien conocimientos e información, sobre mejores prácticas y experiencias en ITS [44]. El ETSI TC ITS es responsable del desarrollo y mantenimiento de estándares, especificaciones y otros entregables para apoyar el desarrollo y la implementación de servicios ITS en la red, redes de transporte, vehículos y usuarios de transporte, incluidos aspectos de interfaz y múltiples modos de transporte e interoperabilidad entre sistemas[45].

De todos ellos, el mayor avance en la formulación de normativas relacionadas con arquitectura ITS es de la ISO, a través de la norma ISO 14813: (Arquitectura del modelo de referencia para el sector), específicamente de sus partes: ISO 14813-1:2015 (*Dominios del servicio ITS, grupos de servicios y servicios*) e ISO 14813-5:2010 (*Requisitos para la descripción de la arquitectura en las normas ITS*) [21]. De esta última, en 2019 existe una versión en desarrollo.

Bělinová, Bureš y Jesty [46] afirman que hay dos enfoques básicos para la creación e implementación de ITS: FRAME (*European ITS Framework Architecture*) y ARC-IT (*Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation*), la arquitectura estadounidense, cuyas principales diferencias radican en el modo y la flexibilidad de uso.

Todas estas iniciativas se han tenido en cuenta para el desarrollo de arquitecturas ITS en países en desarrollo, incluido Colombia, donde en 2010 se presentó una iniciativa denominada Arquitectura Nacional ITS de Colombia [47], basada en la arquitectura ITS USA, que si bien fue adecuada en su momento, no logró su misión y no fue actualizada y adaptada desde que surgió la iniciativa. Su propósito era buscar que los actores ITS lograrán que sus sistemas trabajaran juntos, pudieran compartir información y recursos, para proporcionar un sistema de transporte más seguro, eficiente y eficaz en el movimiento de viajeros y de carga.

Desde 2015 el Gobierno de Colombia, a través de sus Ministerios de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC) y el Ministerio de Transporte (Mintransporte), se encuentra en camino de adoptar la ISO 14813 [48], por lo que la arquitectura ITS que se desarrollaría en éste proyecto, no podría ir en contravía de dicha iniciativa. La adopción de esta ISO se refleja en algunas leyes y decretos relacionados con ITS [49]. Es el caso de:

- el Artículo 84 de la Ley 1450 de 2011 [50], en el cual se define a los ITS como “...un conjunto de soluciones tecnológicas, informáticas y de telecomunicaciones que recolectan, almacenan, procesan y distribuyen información, que se deben diseñar para mejorar la operación, la gestión y la seguridad del transporte y el tránsito”, y se explica la manera cómo se realizará su implementación en el país; y
- el Decreto 2060 de 2015 [21], donde: se reglamenta el artículo anterior; se entregan disposiciones generales sobre los ITS e información para su implementación en el país y se establece la necesidad de implementar el Sistema Inteligente Nacional de Infraestructura, Tránsito y Transporte (SINITT) –con sus respectivos subsistemas–, administrado por el Mintransporte, para garantizar la centralización de la información y la interoperabilidad de los diferentes sistemas.

Sin embargo, estas acciones han sido insuficientes como política de mejoramiento de la seguridad vial y de solución a los demás problemas relacionados con la movilidad en el país. Un ejemplo de ello es el proyecto “Apoyo a la Implementación de la Política Nacional de Seguridad Vial (CO-L1111)”[52], finalizado en marzo de 2018, para cuyo financiamiento el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) le prestó al Gobierno Nacional diez millones de dólares, con él se esperaba, entre otros aspectos, reducir las tasas de muerte y lesiones por accidentes de tránsito en un 25% para 2020, sin embargo, los valores de estas tasas entre 2012 y 2016, por el contrario, muestran una tendencia creciente [53].

Algunas ciudades y regiones de Colombia han realizado proyectos de desarrollo de servicios ITS, aunque estas han sido iniciativas aisladas, sin integración, debido principalmente a que no se cuenta con una arquitectura ITS a nivel nacional, que pueda adaptarse fácilmente al nivel regional (o local) de una ciudad, sea grande o intermedia. A continuación se presentan algunas de esas iniciativas.

En varias ciudades del país (grandes e intermedias) se han desarrollado servicios de foto-detección para el control de velocidad de los vehículos en puntos críticos y detección de vehículos parqueados en lugares no permitidos. Sin embargo, no todos los lugares donde las cámaras se han ubicado son críticos, por lo que en algunos casos estos sistemas solo han sido útiles para aumentar el monto recaudado por infracciones de tránsito. El Gobierno nacional, como respuesta, estableció, mediante el Decreto 718 de 2018 del Ministerio de Transporte [54], los criterios técnicos y tecnológicos para permitir la instalación de éste tipo de sistemas. Más allá de los logros de estos sistemas, es claro que ellos no hacen parte de una solución integral de movilidad de una ciudad, como podría llegar a ser un servicio de movilidad basado en una arquitectura ITS de la ciudad.

Un servicio desarrollado para Medellín [55] mide la velocidad promedio de los vehículos en algunas calles de la ciudad, a través de una combinación de fuentes propias (sensores) y externas (como Waze), cuando la velocidad baja de 10 Km/h se realiza un ajuste de los tiempos de los semáforos del cruce de calles relacionados, asignándole mayor tiempo a la luz verde del semáforo que permite el paso de los vehículos afectados. Según las pruebas realizadas, el cambio ayuda a mejorar la velocidad promedio en las calles donde se detectó el problema y no afecta considerablemente la velocidad promedio en las calles con las que se cruza. A pesar de todo lo positivo, esta iniciativa tiene un problema de diseño, pues al no formar parte de una arquitectura desarrollada para la ciudad, como un todo, tiene potenciales problemas de interoperabilidad con otros servicios de movilidad de la ciudad, cuya solución implica mayores costos y alta complejidad técnica. La interoperabilidad es un problema relevante que se ha hecho evidente en varias ciudades del país y el mundo.

El Gobierno nacional ha estimado conveniente la implementación de Sistemas Estratégicos de Transporte Público (SETP) en ciudades intermedias colombianas, tales como Armenia, Montería, Neiva, Pasto, Popayán, Santa Marta, Sincelejo y Valledupar, y desde 2009 ha destinado presupuesto para ellos, con el fin de intentar solucionar problemas relacionados con la movilidad: mala prestación del servicio, escasa integración, ineficiente articulación y deficiente estructura empresarial [56]. Aunque su implementación debía darse entre 2009 y 2012, por diversos inconvenientes en éstas ciudades, a 2018 aún se había logrado.

Un seguimiento del Gobierno nacional a estas iniciativas [57] realizada en 2015 identificó los siguientes problemas: dificultad de los entes territoriales

para conseguir recursos para la construcción de redes de servicios públicos; interferencias de redes que impiden la normal ejecución de las obras viales a cargo del ente gestor; diseños conceptuales que no contemplan la ingeniería de detalle requerida para la contratación de las obras; y dificultades en la adquisición de predios, dados cambios normativos, procedimientos y casos puntuales de negociación y expropiación. En consecuencia, el Gobierno nacional reprogramó los aportes de la Nación y revisó sus rubros, y acordó con los entes locales un nuevo periodo (2015 – 2021) [57], por lo que su operación no será posible antes de 2022.

Para el caso particular de Popayán, el principal problema fue no contar con recursos para la ejecución de las redes de servicios públicos en los tramos requeridos del proyecto y la adquisición de predios. Según el Plan de Movilidad de Popayán [58], el SETP es un eje estratégico que busca mejorar el servicio de transporte público colectivo a través de la reorganización de las rutas, la construcción de infraestructura vial y espacio público, la implementación de sistemas tecnológicos de apoyo a la operación y la democratización y formalización de la prestación del servicio.

Los componentes tecnológicos más relevantes en el SETP de Popayán [58] son el Sistema de Gestión de Control de Flota (SGCF) y el Sistema de Control de Recaudo (SCR), el primero encargado del seguimiento a los vehículos de transporte público para controlar, principalmente, su recorrido y velocidad, y el segundo para gestionar lo relacionado a ingreso y salida de pasajeros y el pago respectivo.

Los sistemas propuestos en el SETP provienen de los Sistemas Integrados de Transporte Público (SITP) utilizados en las grandes ciudades del país, principalmente del sistema Transmilenio implementado en Bogotá [59], debido principalmente al éxito de su sistema de control de flota. Aunque el SETP es una buena opción para la solución puntual de la movilidad en el transporte público, es importancia tener un sistema inteligente de transporte que analice integralmente todos los componentes, no sólo el transporte público, pues se debe lograr una interacción adecuada con los demás componentes, como son: los vehículos particulares, la gestión de tráfico (e.g., semaforización), los viajeros y demás conductores, y facilite su interoperabilidad.

Para finalizar, es conveniente precisar que el concepto de sistema inteligente de transporte es integral, es decir, es un sistema que abarca de forma global

todos los servicios relacionados con la movilidad, y que en consecuencia estará conformado por una gran cantidad de módulos (subsistemas y objetos físicos) que permitirán la prestación de los servicios requeridos. Cada servicio de movilidad requiere no solo de cierta cantidad de módulos, sino del intercambio de información entre ellos para prestar la funcionalidad requerida, Se trata de servicios de un mismo sistema, no de sistemas independientes. Se hace énfasis en esto último porque en la revisión de la literatura se encontró que en muchos casos se califica como sistema inteligente de transporte a cualquier sistema que cumple una funcionalidad especial, restringida en su alcance, relacionada con movilidad, como por ejemplo: un sistema de detección de accidentes, un sistema de medición de tráfico, un sistema de semáforos inteligentes o un sistema de foto-detección.

## EXPERIENCIAS RELEVANTES

### LOS ITS COMO SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS DE SEGURIDAD VIAL Y ALTO NIVEL DE TRÁFICO

Los ITS están orientados a la seguridad en el transporte, la eficiencia y los servicios al usuario, sus aplicaciones principales son: recolección electrónica de pagos en peajes (*Electronic Toll Collection*, ETC), recolección de datos de autopistas (*Highway Data Collection*, HDC), sistemas de gestión de tráfico (*Traffic Management Systems*, TMS), recolección de datos de vehículos (*Vehicle Data Collection*, VDC) y prioridad para vehículos de emergencia (*Emergency Vehicles Priority*, EVP) [60].

Los ITS han contribuido considerablemente al desarrollo de soluciones que mejoran las condiciones de seguridad vial y el tráfico en todo el mundo. Desde la década de 1970, Estados Unidos, Japón, la Unión Europea y Corea del Sur, entre otros, han implementado soluciones (en colaboración con fabricantes de vehículos) que permiten la comunicación entre los vehículos y la infraestructura vial o entre vehículos, para tratar de mejorar el tráfico y la seguridad [61].

Se han desarrollado servicios ITS para realizar análisis del tráfico utilizando técnicas de visión por computadora, campo que permite el monitoreo automático de la congestión de tráfico, el cumplimiento de normas de tránsito y la interacción entre los vehículos [62].

La seguridad de los ciclistas y peatones en la carretera, que son algunos de los usuarios más vulnerables, también ha sido un enfoque de los desarrollos en ITS, para ello se han utilizado sistemas que permiten la comunicación (a través

de la tecnología) entre bicicletas y vehículos y la detección de peatones en la carretera [63].

### **DISEÑO DE ARQUITECTURAS REGIONALES ITS**

Yokota y Weiland [64] formularon una propuesta para implementar una arquitectura ITS en países en desarrollo y presentaron cuatro criterios para su construcción: asequibilidad, compatibilidad regional, geopolítica y aspectos técnicos. Considerando estos cuatro criterios, propusieron cuatro pasos importantes: definir los servicios de usuario que prestará el ITS; definir los procesos (actividades y funciones) necesarios para proporcionar los servicios de usuario (arquitectura lógica); definir las entidades físicas (subsistemas y terminadores) que forman el ITS; y definir los flujos de arquitectura que conectan los subsistemas y terminadores (arquitectura física). Adicionalmente, propusieron una serie de actividades que complementan el desarrollo de una arquitectura de ITS y sientan las bases para su introducción exitosa: desarrollar un modelo de datos común; establecer estándares de comunicación; usar tecnología de comunicaciones de propósito general; y promover la estandarización. Su propuesta se presentó hace más de doce años y debido a las continuas actualizaciones de las arquitecturas evaluadas, actualmente está desactualizada. Además, aunque mencionan criterios para la especificación de la arquitectura y proponen un proceso básico, no establecen una metodología clara y detallada para el diseño de la arquitectura ITS ni presentan un ejemplo de aplicación de los criterios y del proceso propuesto.

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos presentó en 2006 una propuesta para desarrollar, usar y mantener una arquitectura ITS regional [65], donde establece seis pasos (FIGURA 5), los cuatro primeros relacionados con el desarrollo de la arquitectura ITS: inicio, obtención de datos, definición de interfaces, implementación, uso de la arquitectura regional y mantenimiento de la arquitectura regional. Si bien algunos aspectos de esta propuesta conservan su validez, su aplicación se limita exclusivamente a la arquitectura estadounidense y excluye la posibilidad de incorporar aspectos relevantes de otras arquitecturas de referencia.

La arquitectura FRAME (arquitectura ITS europea), referenciada para el desarrollo de una arquitectura regional [66], propone algunos pasos para pasar de las necesidades de los interesados a los puntos de vista de la arquitectura (FIGURA 6).

Desarrollo de servicios de movilidad basado en una arquitectura de sistemas inteligentes de transporte e Internet de las cosas para ciudades intermedias de países en desarrollo

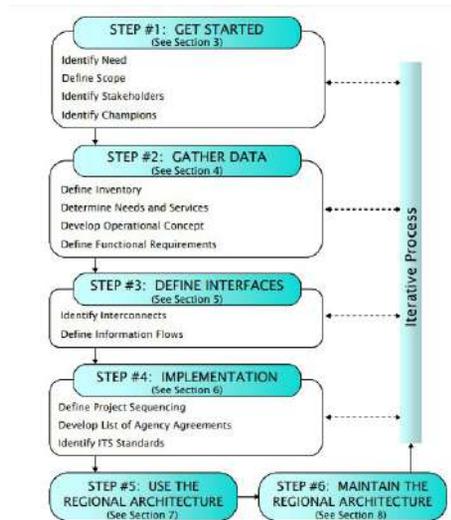


Figura 5. Desarrollo, uso y mantenimiento de una arquitectura ITS regional [65]

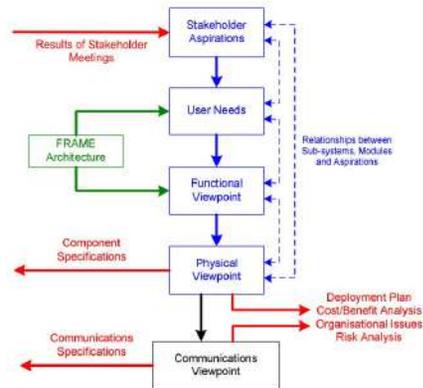


Figura 6. FRAME: metodología de desarrollo de Arquitectura ITS regional [66]

Como se mencionó para la propuesta del Departamento de Transporte [65], en la opción FRAME [66] la arquitectura regional ITS que se puede diseñar se centra exclusivamente en la arquitectura de referencia. Además, el contexto de dicha arquitectura de referencia es muy diferente del contexto en este trabajo.

Por otra parte, Colombia tiene una iniciativa llamada Arquitectura Nacional ITS Colombia [47], que es una adaptación de la arquitectura estadounidense de 2010. Aunque a partir de esta iniciativa se podría llegar a una arquitectura regional o local (de una ciudad del país) no se encontró un procedimiento o metodología para dicha tarea. Por otra parte, dado que no se han realizado actualizaciones de la arquitectura estadounidense –ni se encuentran trabajos de investigación basados en ella–,habría problemas para incluir servicios agregados en los últimos años.

Pachón, Lizcano y Montoya [67] propusieron un modelo para el desarrollo de servicios ITS para ciudades colombianas que utilizó la arquitectura nacional ITS y alternativas al soporte metodológico descrito en la arquitectura estadounidense. Si bien su trabajo se centra en el desarrollo de un modelo de servicio, no presenta una metodología para diseñar una arquitectura ITS particular para una ciudad intermedia, como se pretende en este trabajo. El trabajo de Pachón et al., tuvo los problemas mencionados que se derivan del uso de las arquitecturas base: la falta de una metodología para aplicar dicha arquitectura a nivel de una ciudad y la no inclusión de algunos servicios por la desactualización. Además, el uso del soporte metodológico de la arquitectura ITS americana para el desarrollo de los servicios sólo les permitió llegar hasta cierto punto en el diseño del servicio; cuando se deben decidir aspectos como tecnologías y protocolos, el uso de la arquitectura ITS ya no es suficiente, ya que no se detallan dichos aspectos.

Giraldo, Marín y Bolaños [68] presentaron una propuesta para el desarrollo de la arquitectura de un componente fundamental en un ITS, un sistema de transporte público avanzado (APTS, *Advanced Public Transportation System*), específicamente para una región del país. Su propuesta se basa en la arquitectura estadounidense ITS y aunque presenta un avance importante en el desarrollo de este tipo de arquitectura para una región específica, no realiza el diseño aplicando una metodología propuesta o una que ya esté implementada.

#### **IMPLEMENTACIÓN DE SERVICIOS DE MOVILIDAD BASADOS EN ARQUITECTURAS ITS**

En 2014 Bojan, Kumar y Bojan [23] desarrollaron un prototipo para ITS que es útil para: rastrear un vehículo de servicio público usando un GPS (*Geographical Positioning System*), recibir el pago de boletos, analizar las multitudes y medir el ambiente dentro del autobús. En la infraestructura IoT propuesta por ellos, los datos recopilados de los sensores se envían a través de Internet y son procesados

por el sistema de monitoreo para tomar decisiones útiles y enviarlas al sistema de visualización. Después de definir el sistema para este bus inteligente y su arquitectura, proponen un ITS a través de la explotación de la tecnología de bus inteligente y la infraestructura de IoT.

Por su parte Sherly y Somasundareswari [24] presentan el desarrollo de un ITS responsable de ofrecer asistencia inteligente para estacionamiento de vehículo, basado en IoT. Unos sensores detectan cuándo un espacio de estacionamiento está ocupado o libre y transmiten esa información a un servidor central; cuando se requiere un espacio de estacionamiento, este se solicita a través de una aplicación de teléfono inteligente, ella identifica un sitio libre y guía a los conductores hacia él. Adicionalmente la aplicación permite el pago del valor del servicio de estacionamiento.

INTEL [25] propuso la construcción de un ITS que usa IoT. La arquitectura propuesta tiene tres capas principales: la primera, capa de detección, utiliza un “terminal de vehículo” que interactúa con los conductores y actúa como una “puerta de entrada” para la tecnología dentro del vehículo y los sensores; la segunda, capa de comunicaciones, garantiza una transmisión en tiempo real, segura y confiable, desde un “terminal de vehículo” hasta la siguiente; y la tercera, capa de servicio, soporta varias aplicaciones que utilizan diversas tecnologías, como “computación en la nube”, “análisis de datos” y procesamiento de información y datos.

Estas tres últimas iniciativas presentan propuestas de ITS basadas en tecnología habilitante (particularmente IoT), sin embargo, ninguna de ellas se basa en una arquitectura ITS que se tome como referencia, lo que dificulta el desarrollo de servicios relacionados de forma sostenible, su integración e interoperabilidad. Las dos primeras, además, se centran en la solución de un problema de movilidad específico, no se dirigen a algo que se pueda aplicar a cualquiera de los campos de la movilidad inteligente.

## **DISEÑO DEL PROYECTO**

¿Cuál es el proceso adecuado de desarrollo de servicios de movilidad para ciudades intermedias de países en desarrollo basado en una arquitectura ITS idónea, que implemente sus servicios utilizando tecnologías adecuadas? es la pregunta que da origen a esta investigación. Para resolverla, se define: como objetivo general, formular y validar un proceso para el desarrollo de servicios

de movilidad en una ciudad intermedia de un país en desarrollo, considerando una arquitectura ITS y las tecnologías habilitantes adecuadas; y como objetivos específicos: formular una metodología para el diseño de una arquitectura ITS de una ciudad de este tipo; aplicar la metodología resultante en un caso de estudio en la ciudad de Popayán; diseñar dos servicios de movilidad con base en la arquitectura ITS construida; desarrollar uno de los servicios de movilidad diseñados, como prueba de concepto, y validar lo hecho mediante un piloto del servicio desarrollado.

A continuación, previo a la presentación del método implementado por el proyecto, se presenta un breve análisis de las brechas encontradas entre los abordajes a esta temática encontrados en la revisión de la literatura y los requerimientos que supone lo propuesto en este proyecto, lo cual ayuda a destacar su relevancia y aporte.

#### **ANÁLISIS DE BRECHAS: CASOS REVISADOS VS REQUERIMIENTOS**

Una de las pretensiones del proyecto de investigación fue formular una metodología de diseño de una arquitectura ITS para una ciudad intermedia de un país en desarrollo y aplicarla en una ciudad intermedia en particular. Las brechas encontradas en cuanto al diseño de la arquitectura se relacionan con tres aspectos: la cantidad de arquitecturas de referencia ITS consideradas, el uso del contexto de la ciudad para la selección de los servicios y la presentación de un ejemplo de aplicación de la metodología en una ciudad en particular. Los resultados de la comparación entre requerimientos del proyecto y los hallazgos de la revisión de las experiencias relevantes se presentan en la TABLA 4.

En el marco del proyecto, una vez se cuenta con la arquitectura ITS diseñada para la ciudad en particular, siguiendo la metodología que se diseñe, se desarrollan los servicios de movilidad para la ciudad con base en la arquitectura ITS obtenida. Las brechas entre el desarrollo de servicios de movilidad en los casos revisados y los requerimientos del proyecto halladas, se relacionan con tres aspectos: la arquitectura ITS tomada como base para el desarrollo de los servicios de movilidad, la escalabilidad, interoperabilidad e integración de los servicios desarrollados, y la validación del uso adecuado de la tecnología habilitante utilizada en la arquitectura ITS propuesta (particularmente de la IoT). En la TABLA 5 se presentan los resultados de la comparación entre los requerimientos del proyecto y los hallazgos de la revisión de las experiencias relevantes.

**Tabla 4. Trabajos revisados vs requerimientos del proyecto respecto de metodologías de diseño de arquitecturas ITS y su aplicación**

Aspecto	Requerimientos	Comentarios
Arquitectura ITS tomada como referencia	Analizar las áreas de servicio de diversas opciones a nivel internacional para definir la arquitectura ITS base y usar una arquitectura de referencia, lo más completa posible, complementándola con áreas de servicio de otras arquitecturas ITS internacionales.	Salvo Yokota y Weiland [64], los casos revisados [47], [65] – [68], sólo tienen en cuenta una arquitectura ITS de referencia: la americana o la europea.
Uso del contexto para la selección de servicios	Considerar el contexto particular de una ciudad intermedia de un país en desarrollo para definir la arquitectura ITS de referencia que se toma como base y para analizar los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, legales y ambientales que definan el conjunto de servicios que debe tener en cuenta la arquitectura ITS.	En los casos revisados [47], [64] – [68], solo se consideran algunos factores de la ciudad (o región), principalmente tecnológicos, para el diseño de la arquitectura ITS, por lo que el cumplimiento de este requerimiento es solo parcial.
Presentación de un ejemplo de aplicación	Plantear primero la metodología para diseño de una arquitectura ITS y luego aplicarla diseñando la arquitectura ITS para una ciudad en particular.	Sólo Pachón et al. [67] y Giraldo et al. [68] presentan casos de aplicación en una región del país, sin embargo, no definen inicialmente la metodología a aplicar. Los demás casos revisados [47], [64] – [66], presentan la metodología detallada, pero no su aplicación en el desarrollo de la arquitectura ITS de una región o ciudad en particular.

**Tabla 5. Trabajos revisados vs requerimientos del proyecto respecto de los procesos de desarrollo de servicios de movilidad basados en una arquitectura ITS**

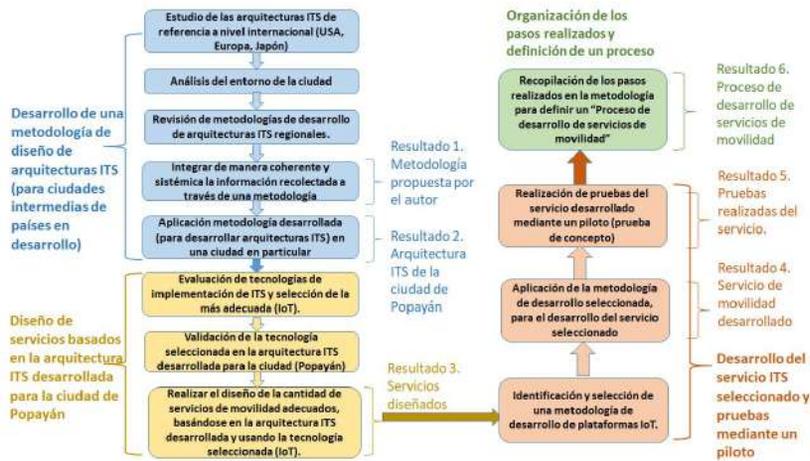
Aspecto	Requerimientos	Comentarios
Arquitectura ITS base	Utilizar una arquitectura ITS de referencia	Aunque Intel [25] presenta una arquitectura ITS de referencia para la construcción de un ITS utilizando IoT, no hace una selección de los servicios específicos a desarrollar. Por su parte, Bojan et al. [23] y Sherly y Somasundareswari [24], presentan el desarrollo de servicios ITS puntuales (control y seguimiento vehículo público, y servicio de parqueo inteligente) utilizando tecnología IoT, pero no utilizan una arquitectura ITS de referencia.
Validación del uso adecuado de la tecnología habilitante	Validar la aplicabilidad de dicha tecnología a la arquitectura ITS propuesta	Ninguno de los casos revisados [23] – [25] valida la tecnología habilitante (en particular IoT) para confirmar si aplica adecuadamente a la arquitectura ITS que se toma como base para el desarrollo de los servicios.

**Tabla 5. Trabajos revisados vs requerimientos del proyecto respecto de los procesos de desarrollo de servicios de movilidad basados en una arquitectura ITS (continuación)**

Aspecto	Requerimientos	Comentarios
Escalabilidad, interoperabilidad e Integración.	Garantizar la escalabilidad, interoperabilidad e integración de los servicios desarrollados.	Las propuestas de Bojan et al. [23] y Sherly y Somasundareswari [24] no garantizan la escalabilidad, interoperabilidad e integración de los servicios desarrollados, debido a que ellos se realizan sin una base de referencia. La propuesta de Intel [25] presenta la arquitectura de un sistema ITS basado en IoT, pero no los servicios específicos a desarrollar, sin embargo, con base en la arquitectura ITS planteada es posible lograr la escalabilidad, interoperabilidad e integración requeridas.

## MÉTODO

La metodología con que se abordó esta investigación se divide en cuatro puntos principales, como se ilustra en la FIGURA 7 y se explica a continuación.



**Figura 7. Metodología utilizada en el proyecto de investigación**

### DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UNA ARQUITECTURA ITS

Inicialmente se realizó un estudio acerca de las arquitecturas ITS y de cómo diseñarlas para una ciudad en particular, para ello se realizaron algunas actividades, como: el estudio de las arquitecturas ITS de referencia más representativas a nivel internacional (estadounidense, europeo, asiático,

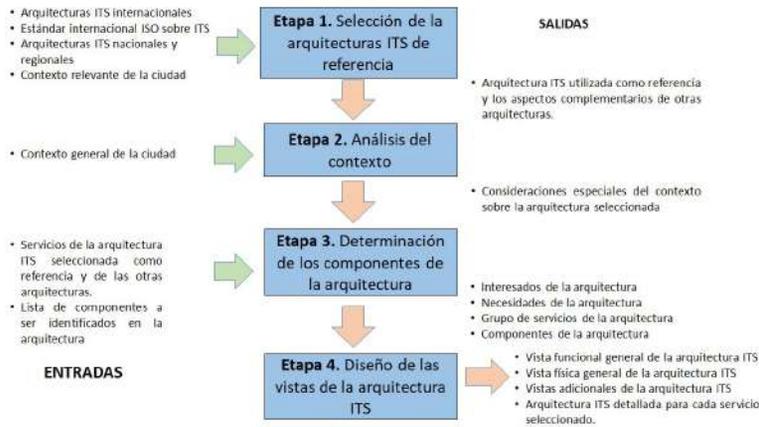
colombiano); el análisis del entorno de la ciudad a través la herramienta PESTLE (*Political, Economic, Social, Technological, Legal and Environmental*), una técnica de análisis empresarial, que incluye aspectos políticos, económicos, sociales, tecnológicos, legales y ambientales) [69]; y el estudio de metodologías para el desarrollo de una arquitectura ITS regional que proveen: las arquitecturas ITS internacionales –tales como ARC-IT, la arquitectura americana, y FRAME, la arquitectura europea–; las arquitecturas ITS Nacionales; y las utilizadas regionalmente (en las ciudades).

En el proceso de diseño de la arquitectura ITS se identificó la conveniencia de integrar de manera coherente, sistémica y ordenada estas piezas no articuladas, a través de una metodología para la formulación de la arquitectura ITS, lo que además se consideró útil para trabajos similares en otras ciudades intermedias del país o de otros países en desarrollo.

Las etapas de la metodología se diseñaron incluyendo: las entradas, las actividades que deben desarrollarse; las técnicas y herramientas que se pueden utilizar para ejecutar las actividades en cada etapa; y las salidas, que constituyen los entregables que resultan de la ejecución de las actividades. El uso de entradas, herramientas y productos se tomó como una buena práctica utilizada en la descripción de las metodologías de gestión de proyectos del PMI (*Project Management Institute*) y Scrum.

Como punto clave en el desarrollo de la metodología de diseño de la arquitectura ITS, se tuvo en cuenta incluir diversas fuentes de arquitecturas ITS internacionales, lo que se realizó considerando cuáles eran las áreas de servicio que abarcaban todas las arquitecturas ITS estudiadas, identificando cuál de ellas era la más completa y complementándola con funcionalidades importantes de otras arquitecturas que no estuvieran presentes en la seleccionada. Otro punto clave en la metodología fue considerar el contexto completo de la ciudad, esto es sus aspectos políticos, económicos, sociales, tecnológicos, legales y ambientales, a través de la herramienta PESTLE, en la selección de los servicios que harían parte de la arquitectura ITS. La relevancia de esto último es mayor si se considera que en las metodologías revisadas sólo algunos aspectos eran considerados. La metodología propuesta se resume en la FIGURA 8.

Una vez desarrollada la metodología se realizó su aplicación para la formulación final de la arquitectura ITS para la ciudad de Popayán, siguiéndola paso a paso. Se definieron los interesados (*stakeholders*) y sus necesidades y los servicios a considerar en la arquitectura, para así llegar a las vistas lógica y



**Figura 8. Diagrama de flujo integral de la metodología propuesta**

física generales de la arquitectura ITS para la ciudad de Popayán (los detalles de la aplicación de la metodología para el diseño de esta arquitectura se pueden consultar en el ANEXO G de [70]).

#### **DISEÑO DE SERVICIOS BASADOS EN LA ARQUITECTURA ITS DESARROLLADA, PARA POPAYÁN**

Una vez diseñada la arquitectura, se evaluaron las tecnologías que pueden ser utilizadas para implementar los servicios de dicha arquitectura, ya que la arquitectura define qué se debe hacer, mientras que el diseño y la implementación definen cómo hacerlo.

Inicialmente, se procedió a identificar las tecnologías habilitantes más adecuadas para la implementación del ITS, para ello se utilizó la información recopilada (ver secciones *Marco teórico* y *Normatividad y experiencias relevantes* de este documento). Se determinó que IoT es la tecnología adecuada porque ha sido utilizado con éxito en la gran mayoría de las soluciones propuestas para ciudades inteligentes y ha permitido que la arquitectura ITS se materialice y garantice que los servicios se desarrollan y proporcionan al ciudadano o al usuario final [71].

A continuación, se consideró importante validar si la tecnología IoT era adecuada para la implementación de la arquitectura ITS para Popayán, para ello se procedió a investigar sobre las arquitecturas IoT de referencia internacional y a evaluar diferentes opciones para identificar la más adecuada

en este caso. A partir de las arquitecturas revisadas [31] – [36], detalladas en el marco teórico, se realizó una comparación, evaluando la cantidad de capas propuestas y la pertinencia de las mismas en el entorno de una ciudad intermedia de un país en desarrollo. Una vez establecido que la arquitectura más completa es la presentada por el IoT-A (*IoT Architecture*) [31], dicha arquitectura se adaptó a las características particulares de Popayán y se planteó una opción basada en ella (ver FIGURA 9).



**Figura 9. Arquitectura IoT propuesta**

Una vez que se definió la arquitectura de IoT apropiada, se procedió a validar si ella se adaptaba para realizar la implementación tecnológica de la arquitectura ITS determinada para la ciudad de Popayán. Dicha validación se realizó identificando las capas de la arquitectura IoT en las cuales fueron ubicados de la mejor manera los objetos físicos –que a su vez contienen los objetos funcionales– de la arquitectura ITS. De dicha validación se obtuvo un diagrama de adaptación de la arquitectura ITS utilizando IoT (FIGURA 10), importante para el diseño específico de los servicios ITS a implementar.

El diagrama propuesto sirve para cualquier servicio de movilidad que se vaya a diseñar y desarrollar para la ciudad de Popayán, a eso se debe su complejidad y la cantidad de objetos (cuando se va a realizar el diseño de un servicio de movilidad en particular se emplean solo un subconjunto de todos los elementos presentados en el diagrama).

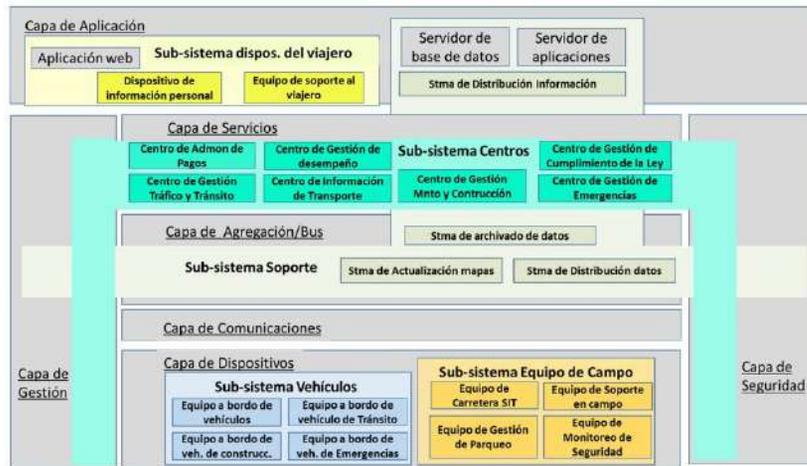


Figura 10. Arquitectura ITS adaptada a la tecnología IoT

Una vez se realizó el diseño de la arquitectura ITS adaptada a IoT, se determinó cuántos y cuáles serían los servicios a diseñar. Como alcance adecuado del proyecto de investigación, se determinó diseñar dos servicios de movilidad o servicios ITS. Los siguientes aspectos, relacionados con las principales causas de accidentes de tráfico en Colombia, se tuvieron en cuenta en la comparación y evaluación de servicios: mejora de la seguridad vial, relación con el mejoramiento de la congestión de tráfico, utilidad del servicio para el usuario final y complejidad, en términos de hardware y software necesarios, actores involucrados y tiempo de desarrollo. Todos los servicios determinados para la arquitectura ITS de Popayán (tomados de la arquitectura ITS de referencia base y de los aspectos clave de las demás arquitecturas), se detallan en el ANEXO G de [70].

Como resultado de la evaluación, los servicios seleccionados fueron: *Seguimiento de vehículos de transporte público* (PT01 en la arquitectura ARC-IT, utilizada como referencia internacional base) y *Medición de tráfico* (TM05 en ARC-IT).

#### DESARROLLO DEL SERVICIO ITS SELECCIONADO Y PRUEBAS MEDIANTE UN PILOTO

Para realizar el desarrollo del servicio “Seguimiento de vehículos de transporte público”, se identificó y seleccionó una metodología para el desarrollo de plataformas IoT, tomando como base dos documentos, uno de Bahga

y Madisseti [32], otro de [enterprise-iot.org](http://enterprise-iot.org) [72]. El primero de ellos fue seleccionado porque tiene mayor número de citas, ha sido referenciado por varias universidades del mundo en sus cursos sobre IoT, y los diez pasos sugeridos para una implementación son claros y pertinentes.

Los diez pasos propuestos por Bahga y Madisseti para el desarrollo del servicio son: definición del propósito y de los requerimientos del sistema; modelos de especificación del proceso, el dominio y la información; especificaciones del servicio, a nivel IoT, de la vista funcional y de la vista operacional; integración de componentes y dispositivos; y desarrollo de la aplicación. Estos pasos se siguieron, uno a uno, para el desarrollo del servicio (ver ANEXO H de [70]). Una vez desarrollado el servicio se realizó un piloto para probar su funcionamiento, cuyos resultados se presentan en la sección *Resultados*.

#### **ORGANIZACIÓN DE LOS PASOS REALIZADOS Y DEFINICIÓN DE UN PROCESO.**

Una vez realizados los pasos mencionados, fueron organizados y documentados adecuadamente, de tal forma que sea posible seguirlos a través de un proceso ordenado. Los pasos propuestos para dicho proceso se presentan en la sección siguiente.

## **RESULTADOS**

### **METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR UNA ARQUITECTURA ITS EN UNA CIUDAD INTERMEDIA DE UN PAÍS EN DESARROLLO**

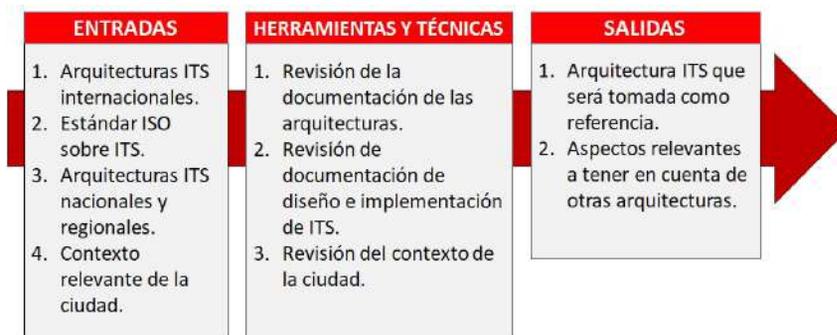
#### **SELECCIÓN DE LA ARQUITECTURA ITS DE REFERENCIA**

En la FIGURA 11 se presentan las entradas, herramientas y salidas de la primera etapa de la metodología, en ella se revisan las versiones actualizadas de las arquitecturas representativas a nivel internacional, de los estándares, de la arquitectura nacional del país evaluado y de las arquitecturas regionales (o de ciudades) diseñadas en el país.

Las áreas de servicio que cada arquitectura de referencia considera constituyen uno de los factores de comparación en la revisión. Es importante que la gran mayoría de los servicios de interés para la ciudad se encuentren incluidos en la arquitectura que se selecciona como referencia. El uso de una matriz facilita

la identificación de los servicios incluidos para cada arquitectura. El contexto relevante de la ciudad relacionado con la movilidad también debe tenerse en cuenta como un factor de decisión para determinar las salidas de la etapa.

La revisión propuesta en esta etapa permite determinar una arquitectura ITS de referencia seleccionando alguna de las propuestas revisadas, identificando (para complementar) aspectos relevantes de otras arquitecturas de referencia.



**Figura 11. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 1**

#### **ANÁLISIS DEL CONTEXTO DE LA CIUDAD**

En la FIGURA 12 se presentan las entradas, herramientas y salidas de la segunda etapa de la metodología. Los resultados de la etapa anterior se utilizan como entradas para esta etapa, para revisar todos los servicios incluidos en la arquitectura de referencia con respecto a aquellos que la ciudad necesita, según su contexto.

El contexto de la ciudad es además otra entrada en esta etapa y debe analizarse en un sentido más amplio, no solo revisar la movilidad, como en la etapa anterior. Además de la revisión de los servicios de la arquitectura de referencia mencionada, se debe utilizar una herramienta de análisis de contexto en esta etapa. Se utilizó PESTLE [69] porque permite la evaluación de los aspectos políticos, económicos, sociales, tecnológicos, legales y ambientales de la ciudad, que tienen relación con la movilidad, la infraestructura de transporte, los medios de transporte utilizados y los documentos normativos relacionados.

Como resultado de la etapa, se obtienen las consideraciones especiales del contexto de la ciudad, que sirven para determinar un subconjunto ideal de servicios y componentes de arquitectura en las siguientes etapas.



Figura 12. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 2

#### DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA

En la FIGURA 13 se presentan las entradas, herramientas y salidas de la tercera etapa de la metodología. Los resultados obtenidos en las etapas 1 y 2 se utilizan como entradas en esta etapa. Además, se debe considerar como entrada el listado de los componentes específicos que se deben identificar para presentar la arquitectura ITS de la ciudad (a través de las vistas más comunes, como son la física y la lógica).



Figura 13. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 3

Algunos componentes, que conforman los puntos de vista de la arquitectura ITS de la ciudad varían según la arquitectura que se tome como referencia. Las partes interesadas, sus necesidades y los servicios proporcionados son componentes comunes en las arquitecturas de referencia revisadas, mientras que otros elementos son utilizados solo por una u otra arquitectura en particular.

La lista de interesados en la arquitectura, la lista de necesidades identificadas, el grupo de servicios incluidos en la arquitectura y el resto de componentes particulares de la arquitectura ITS (dependiendo de la arquitectura de referencia seleccionada) deben obtenerse utilizando herramientas de identificación de partes interesadas, y priorización de necesidades y de servicios.

#### DISEÑO DE LAS VISTAS DE LA ARQUITECTURA ITS

En la FIGURA 14 se presentan las entradas, herramientas y salidas de la cuarta etapa de la metodología. Los resultados de la etapa 3 se presentan en esta etapa como entradas. Se debe usar una herramienta de diseño para presentar las vistas de la arquitectura de ITS. Estas vistas pueden usar el tipo de diagrama que usa la arquitectura de referencia ITS o pueden usar un lenguaje estándar de descripción de sistemas. Se deben desarrollar, como mínimo, las vistas funcional y física de la arquitectura ITS general; si se considera necesario (para mayor claridad), se pueden agregar vistas adicionales, tales como la de comunicaciones.

Además de las vistas de la arquitectura general de ITS (por lo general física y funcional), se deben implementar arquitecturas ITS detalladas por cada



Figura 14. Entradas, herramientas y técnicas y salidas de la etapa 4

servicio seleccionado. La arquitectura detallada de cada uno de los servicios emplea un subconjunto de componentes de la arquitectura ITS general.

## **POPAYÁN: ARQUITECTURA ITS SEGÚN LA METODOLOGÍA DESARROLLADA**

### **ARQUITECTURA ITS DE REFERENCIA Y COMPLEMENTOS DE OTRAS ARQUITECTURAS**

En esta etapa, se efectuó la comparación entre la arquitectura ITS de referencia, la arquitectura americana ARC-IT, en su versión 8.0 [39], la arquitectura FRAME [40], la arquitectura de Malasia [42], la propuesta de ISO [21] y la arquitectura colombiana [47]. Utilizando una matriz se establecieron las áreas de servicio comunes entre las diferentes arquitecturas y las áreas de servicio particulares de cada opción. Los detalles de la matriz mencionada se pueden revisar en el ANEXO G de [70].

ARC-IT (que cubría 13 de las 16 áreas de servicio) y la arquitectura FRAME (que cubría 12 de las 16) eran las arquitecturas que cubrían la mayoría de los servicios. Considerando todos los aspectos identificados del contexto y la comparación realizada con la matriz, se determinó que la arquitectura ITS más adecuada para la ciudad era ARC-IT. A esta arquitectura se le agregó como complemento el área de servicio de la arquitectura FRAME denominada “Cumplimiento de la ley”, y el área de servicios “Gestión del rendimiento” propuesta en la arquitectura ISO.

### **CONSIDERACIONES ESPECIALES DEL CONTEXTO GENERAL DE LA CIUDAD DE POPAYÁN**

La ciudad tiene una superficie de 512 km<sup>2</sup> y aproximadamente 400,000 habitantes. De acuerdo con los estudios socioeconómicos realizados por la Cámara de Comercio de Cauca, sus principales actividades económicas son el comercio, el alojamiento y los servicios de alimentos, y la industria manufacturera. La ciudad está muy influenciada cultural, social, económica y tecnológicamente por la cultura estadounidense, más que por la cultura europea. Su sistema de transporte público actual tiene problemas importantes de eficiencia, seguridad, confiabilidad y viabilidad ambiental.

### **GRUPOS DE INTERÉS, NECESIDADES Y GRUPO DE SERVICIOS SELECCIONADOS**

Para identificar las partes interesadas relevantes se utilizaron varias herramientas, entre ellas, el archivo histórico de proyectos relacionados con

movilidad y transporte de la ciudad, documentos de arquitectura ITS de otras ciudades e información proporcionada por entidades del gobierno local.

La identificación de las partes interesadas más relevantes permitió realizar un análisis de prioridades de sus necesidades. De las 17 necesidades identificadas, las prioritarias son: la reducción de la tasa de accidentes en movilidad, el cumplimiento de las normas de tránsito por parte de los conductores y los peatones, la información de tráfico en puntos críticos de la ciudad y la reducción del tiempo en las transferencias de viajeros.

Los paquetes de servicios descritos en la arquitectura de referencia, las necesidades prioritarias de los interesados y las consideraciones especiales identificadas en el contexto de la ciudad se tomaron en cuenta para la determinación de los servicios considerados en la arquitectura de ITS. Finalmente, se tomaron en cuenta 35 servicios para la arquitectura ITS de la ciudad (33 provenientes de la arquitectura ARC-IT y los dos adicionales citados, provenientes de otras arquitecturas de referencia).

Los otros elementos que se identificaron para la arquitectura ITS de la ciudad: procesos funcionales, subsistemas, objetos físicos y objetos lógicos, corresponden a elementos específicamente utilizados en la arquitectura de referencia seleccionada (ARC-IT). En el ANEXO G de [70] se detalla, con el uso de tablas y evaluaciones realizadas, la identificación de los interesados, sus necesidades, los grupos de servicios y demás elementos de la arquitectura ITS.

#### **VISTAS PRINCIPALES: ARQUITECTURA GENERAL ITS Y ARQUITECTURAS DETALLADAS POR SERVICIO**

Con los componentes identificados se procedió a diseñar las vistas de la arquitectura ITS de Popayán. Para presentar las vistas generales se utilizaron los tipos de diagramas que presenta la arquitectura ITS de referencia, es decir, se adaptaron los diagramas de la arquitectura estadounidense (ARC-IT) para la arquitectura ITS para Popayán, porque tienen un nivel adecuado de comprensión y un alto nivel de uso en el contexto internacional.

Inicialmente, se procedió con la vista funcional general de la arquitectura ITS, para ello se tomó en cuenta a las partes interesadas relevantes y a los procesos funcionales identificados (FIGURA 15). Esta vista permite visualizar los procesos seleccionados, las relaciones entre estos procesos y entre los procesos y las partes interesadas. Detalles adicionales sobre las vistas de la arquitectura ITS diseñada para Popayán se pueden revisar en el ANEXO G de [70].

Desarrollo de servicios de movilidad basado en una arquitectura de sistemas inteligentes de transporte e Internet de las cosas para ciudades intermedias de países en desarrollo

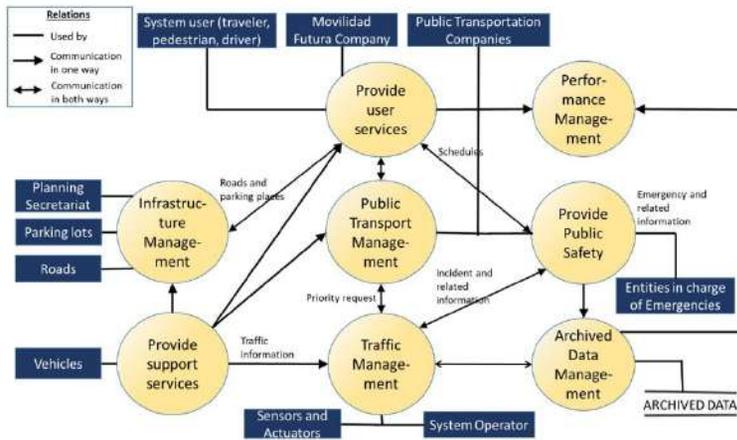


Figura 15. Vista funcional general de la arquitectura ITS de Popayán

Los actores del sistema, los subsistemas y los objetos físicos se tuvieron en cuenta para la vista física general de la arquitectura. La vista física que se propuso para la arquitectura ITS de Popayán se presenta en la FIGURA 16. La vista física general permite visualizar los subsistemas propuestos y los objetos físicos dentro de cada subsistema. Los objetos físicos presentes deben proporcionar los servicios seleccionados en la arquitectura.

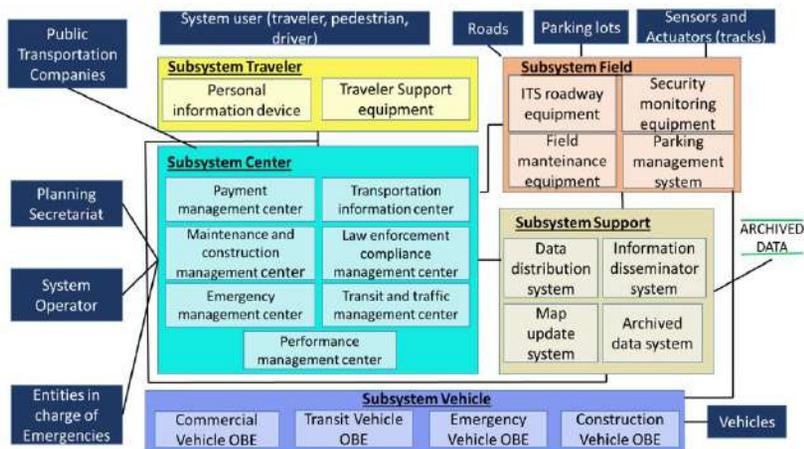


Figura 16. Vista física general de la arquitectura ITS de Popayán

## DISEÑO DE DOS SERVICIOS DE MOVILIDAD INTELIGENTE PARA POPAYÁN

El diseño de los servicios de movilidad para la ciudad, con base en la arquitectura desarrollada, inicia con la identificación de las tecnologías habilitantes con las que es factible implementar dicha arquitectura, para ello, se revisaron algunas tecnologías habilitantes utilizadas en implementación de ITS –como las redes de sensores, la IoT y el *big data*–. Aunque las tres son tecnologías muy relacionadas, y en algunos casos se consideran complementarias, se realizó una evaluación de ellas para determinar la más adecuada. En la revisión se tuvo en cuenta principalmente el porcentaje de referencias de ITS que hubiesen sido implementados a través de dicha tecnología, lo cual indica una tendencia y en algunos casos mejores resultados obtenidos.

El ejercicio permitió determinar que la IoT es la tecnología más adecuada. A partir de las arquitecturas revisadas de IoT, se generó una propuesta (FIGURA 9). Con la arquitectura IoT apropiada para implementar un sistema en la ciudad, a través de un proceso de ubicación de los subsistemas y de los objetos físicos de la arquitectura ITS en la arquitectura IoT, se obtuvo una arquitectura ITS adaptada a la tecnología IoT (ver FIGURA 10).

Como se mencionó, se seleccionaron dos servicios (PT01 y TM05) para realizar su diseño detallado, de acuerdo con los parámetros previamente indicados. El proceso de selección de éstos dos servicios y otros detalles del diseño se presentan en detalle en el ANEXO H de [70]. El servicio PT01 permitirá el control de la velocidad de los vehículos de transporte público y su cumplimiento de otras leyes de tránsito, en un intento de minimizar el número de accidentes de estos vehículos; el servicio TM05, por su parte, proporcionará a los usuarios y conductores información valiosa (velocidad promedio en las vías, principalmente) para que puedan realizar viajes con mayor eficiencia, utilizando vías alternas, y evitar el aumento del tráfico en las vías congestionadas.

Los diagramas detallados de los dos servicios, los cuales utilizan un subconjunto de los elementos presentados en la FIGURA 10, específicamente los elementos relacionados con el servicio en particular, se presentan en las FIGURAS 17 y 18.

Una vez desarrollados los diagramas detallados de los dos servicios, se describieron los objetos físicos y lógicos de cada uno, presentando la funcionalidad específica que se desarrollará, y se identificaron los elementos (hardware, software, comunicaciones e interacciones) con los cuales se puede diseñar el servicio. Con los elementos y la funcionalidad descritos, se realizó el diagrama de diseño

Desarrollo de servicios de movilidad basado en una arquitectura de sistemas inteligentes de transporte e Internet de las cosas para ciudades intermedias de países en desarrollo

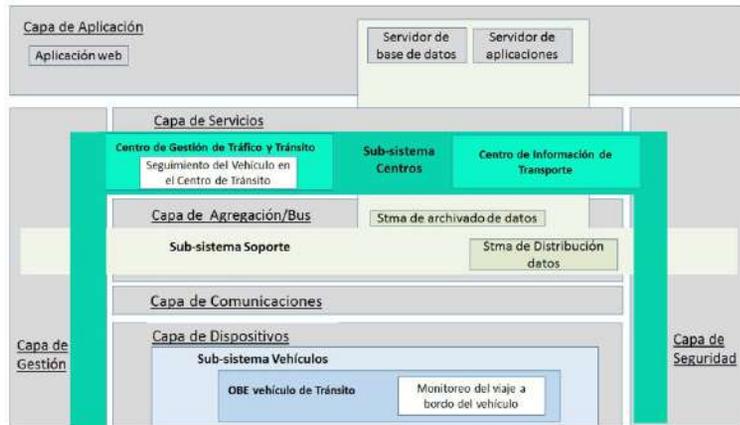


Figura 17. Diagrama detallado del servicio PT01

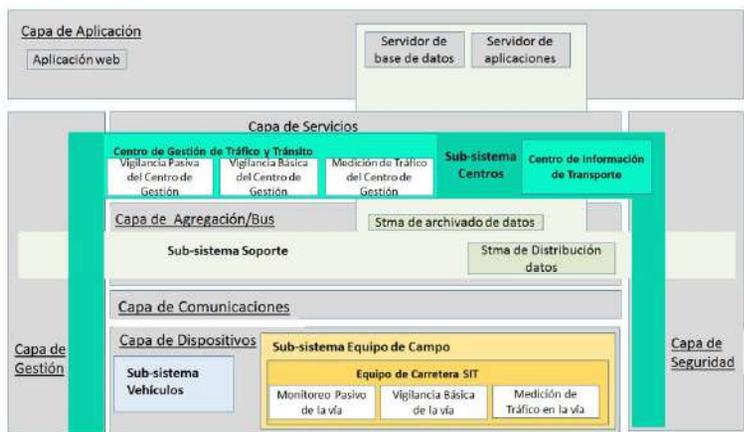


Figura 18. Diagrama detallado del servicio TM05

específico de cada servicio, el cual indica el tipo de elementos que se utilizarán, su ubicación física y los flujos de información. Los diagramas de diseño específico de los servicios se presentan en las FIGURAS 19 y 20, respectivamente, en ellas es importante resaltar, en la primera, los elementos de hardware utilizados en el OBE (*On-Board Equipment*) del vehículo de tránsito: una tarjeta microcontrolada con acceso a WiFi a la cual se conectan un GPS y un sensor de humedad y temperatura; y en la segunda los elementos de hardware utilizados en el equipo de carretera ITS: una tarjeta microcontrolada robusta que permite la conexión de una cámara de video y conexión cableada a Internet (*ethernet*).

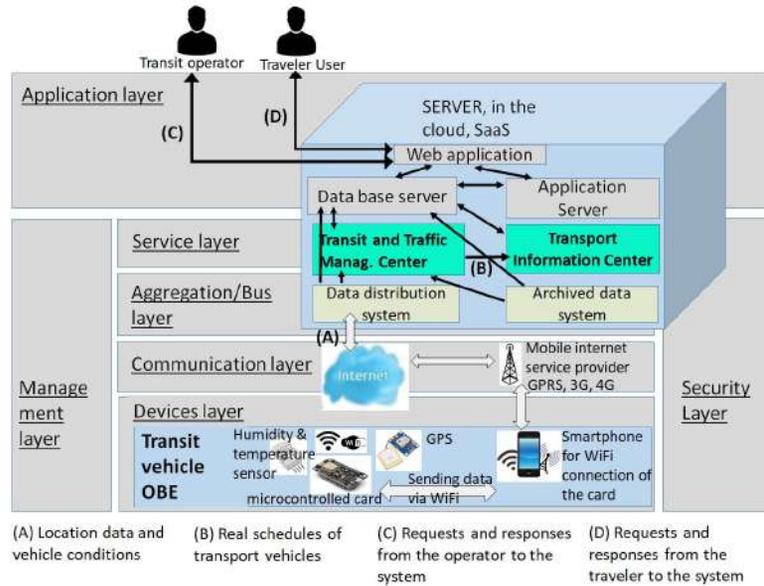


Figura 19. Diagrama de diseño específico del servicio PT01

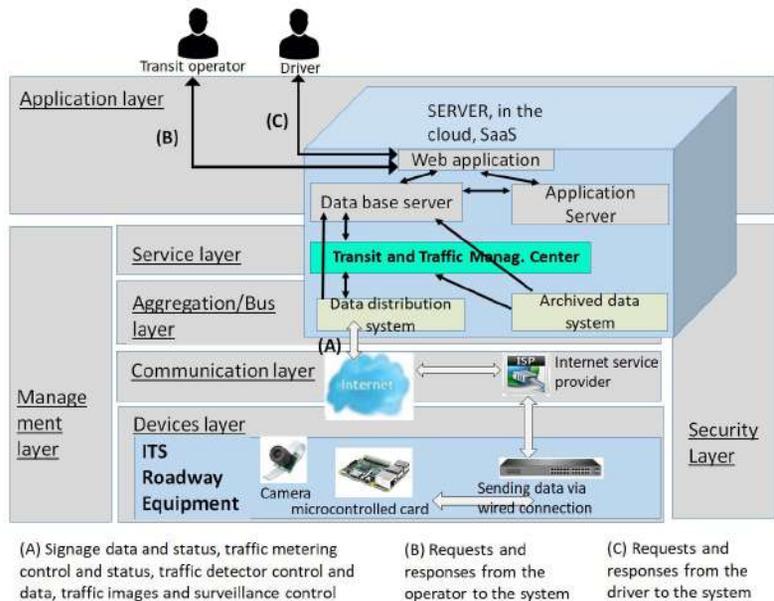
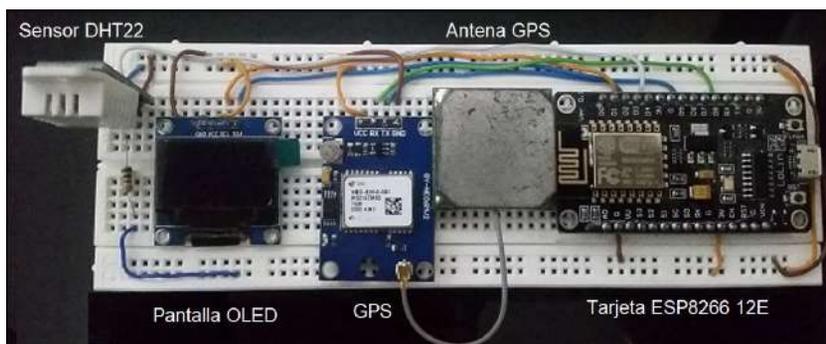


Figura 20. Diagrama de diseño específico del servicio TM05

### SERVICIO DE MOVILIDAD DESARROLLADO

Como se había previsto, se seleccionó uno de los dos servicios para desarrollar el servicio de movilidad, el PT01 o seguimiento al vehículo de transporte público fue seleccionado por ser el que mayor impacto puede generar, si se tiene en cuenta que la ciudad presenta altas tasas de accidentalidad, superiores al promedio nacional, mientras que el servicio de medición de tráfico está más enfocado a solucionar problemas de alto nivel de congestión, y este aún no demasiado crítico en la ciudad.

Para el desarrollo del servicio se siguió la metodología seleccionada de desarrollo de plataformas IoT. Todos los detalles relacionados y los entregables de cada una de las etapas se presentan en el ANEXO I de [70]. Es importante resaltar el componente hardware del OBE (FIGURA 21). Algunas interfaces de la aplicación web desarrollada se presentan en el siguiente punto.

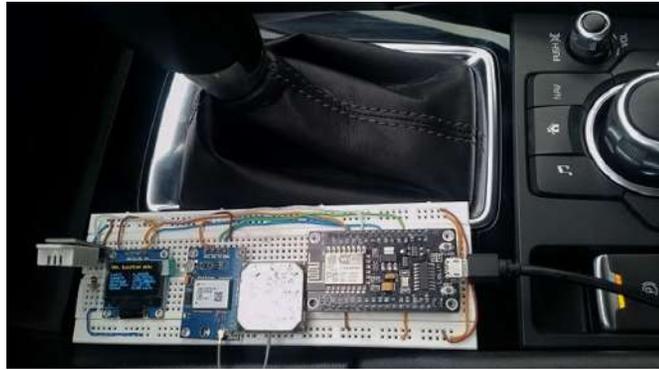


**Figura 21. Circuito obtenido, montado en protoboard**

### RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL SERVICIO DESARROLLADO

Una vez que se desarrolló el sistema para la prestación del servicio, se definió el experimento a realizar. El OBE desarrollado fue instalado en un vehículo de prueba, alimentándolo a través de un puerto USB (FIGURA 22). Para la conexión WiFi a Internet requerida por el OBE se utilizó un teléfono inteligente, que sirve de enrutador para permitir el acceso.

Se realizaron más de veinte viajes dentro de la ciudad, revisando los datos obtenidos en línea y las alertas generadas con respecto de la velocidad máxima



**Figura 22. Circuito operando dentro del vehículo**

establecida. El sistema desarrollado para el servicio PT01 cumplió con los requisitos establecidos (funcionales y no funcionales). Aunque se presentaron inconvenientes con el almacenamiento de los datos (debido a presencia de áreas con baja cobertura de la red de datos celulares), los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Las principales características del sistema desarrollado son:

- El sistema presenta información relevante para los dos tipos de usuarios de la aplicación web desarrollada (viajero y empresa de transporte) e información útil (operación normal del dispositivo y velocidad actual) para el conductor, a través de la pantalla OLED (*Organic Light-Emitting Diode*).
- El lapso de tiempo entre el envío de información de los vehículos es de diez segundos y es posible reducirlo a ocho. Diez segundos son adecuados para establecer una distancia no demasiado grande (en metros lineales) entre dos puntos consecutivos de localización del vehículo, ya que a 60 Km/h, la máxima velocidad esperada, la distancia recorrida en ese lapso sería de alrededor de 170 m., si se disminuye a ocho segundos, esa distancia se reduciría a 140 m.
- La pantalla OLED ubicada en el vehículo de tránsito OBE presenta mensajes de bienvenida, conexión a WiFi y datos que se miden cada diez segundos, y le informa al conductor cuándo el vehículo excede la velocidad máxima configurada en el sistema, lo que le ayuda a conocer cuándo todo opera normalmente.

- El costo de desarrollo del OBE fue de 38 dólares, valor que corresponde únicamente al prototipo de prueba de concepto, es decir, al circuito en la protoboard; para un modelo en producción el costo sería mayor.
- El equipo OBE actual contempla el desarrollo de uno de los servicios, sin embargo, no se pretende que cada servicio que se desarrolle tenga su propio dispositivo, por ello se requiere planear los servicios que se implementarán en la ciudad en el mediano plazo, y determinar si el OBE propuesto es suficiente para la prestación de todos ellos o si se requiere otro dispositivo con mayor capacidad.
- El costo anual de la plataforma contratada como SaaS (*Software as a Service*) es de aproximadamente 60 dólares para el piloto mencionado, sin embargo, para un esquema en producción se tendría que adquirir una plataforma significativamente más robusta, que permita el funcionamiento simultáneo de una gran cantidad de vehículos de transporte público. Con esto en mente se hizo un cálculo aproximado de la capacidad en tamaño de la base de datos necesaria, para mantener información durante al menos un mes. Tomando como base doce horas diarias de tránsito por vehículo, un mensaje cada diez segundo y una flota de aproximadamente 637 vehículos, se estima un total de 2.751.840 mensajes / día; considerando que cada mensaje ocupa aproximadamente 632 bytes, se requeriría una base de datos de aproximadamente 1,74 GB, tamaño que no manejaría con eficiencia el servicio contratado actualmente.
- Las herramientas y plataformas utilizadas son de código abierto, por lo que no generan costos de licenciamiento.
- La aplicación web maneja autenticación de usuario en la interfaz inicial, a través de inicio de sesión y contraseña, y autorización de acceso a las otras interfaces mediante el manejo de tipos de usuario.
- A modo de ejemplo, en las FIGURAS 23 y 24 se muestra dos interfaces de la aplicación web desarrollada para el sistema, respectivamente: las ubicaciones registradas de un vehículo en un periodo de tiempo, presentadas gráficamente utilizando Google Maps Platform; y las alertas de velocidad que se generan cuando se excede la velocidad máxima configurada en el sistema (en la imagen, el máximo establecido en 40 km/h).



Figura 23. Interfaz de la aplicación web: ubicaciones del vehículo registradas

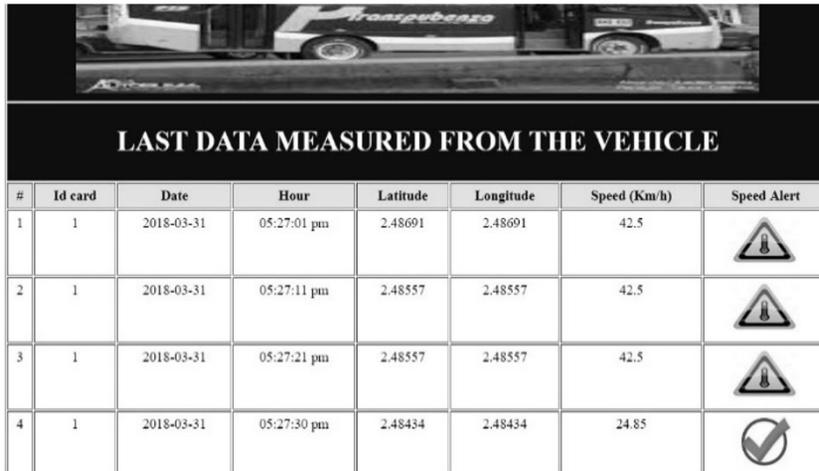


Figura 24. Interfaz web del usuario operador: alertas de velocidad generadas

## PROPUESTA PARA EL DESARROLLO DE SERVICIOS DE MOVILIDAD

Una vez realizadas todas las actividades descritas, se pudo recopilar un proceso para el desarrollo de servicios ITS –en una ciudad intermedia de un país en desarrollo–, con base en una arquitectura adecuada, incluyendo las buenas prácticas identificadas y la experiencia adquirida en el desarrollo del servicio ITS PT01. Los siete pasos sugeridos en el proceso son:

- Utilizar la metodología descrita para diseñar una arquitectura ITS general adecuada para la ciudad donde se van a desarrollar los servicios de movilidad: se puede utilizar como modelo la arquitectura diseñada para Popayán, inclusive, si la ciudad seleccionada tiene características muy similares a Popayán, se podría utilizar la arquitectura ITS diseñada para ella, sin necesidad de seguir los pasos de la metodología propuesta.
- Seleccionar los servicios ITS cuya implementación sea prioritaria de acuerdo con el contexto de la ciudad: una vez se tiene la arquitectura ITS general de la ciudad, se procede a la selección de estos servicios ITS prioritarios, los que estarán identificados de acuerdo con la arquitectura ITS tomada como referencia (por ejemplo, PT01 y TM05 en el caso de los servicios seleccionados en éste trabajo, ajustados de la arquitectura de referencia seleccionada que fue la ARC-IT).
- Diseñar la arquitectura específica de cada servicio ITS: se debe realizar un diseño específico para cada uno de los servicios, que aclare cuáles son los componentes que utilizará y todas sus interacciones. Dicho diseño será un subconjunto de la arquitectura ITS general especificada a un mayor detalle. En el diseño específico por servicio se recomienda utilizar las herramientas metodológicas (diagramas principalmente) sugeridas por la arquitectura ITS tomada como referencia.
- Seleccionar la tecnología (o tecnologías) de desarrollo de los servicios diseñados: aunque en este trabajo se seleccionó IoT, por ser actualmente la tecnología más indicada para implementar éste tipo de servicios, es necesario evaluar, en su momento, las tecnologías disponibles y determinar la más adecuada.
- Definir la metodología de desarrollo dependiendo de la tecnología seleccionada: una vez determinada la tecnología de desarrollo, se debe encontrar una metodología adecuada de dicha tecnología para aplicarla en el desarrollo de los servicios.
- Aplicar la metodología de desarrollo seleccionada: se debe proceder a aplicar uno a uno los pasos o etapas sugeridos en la metodología, modificando, si es requerido, alguno de los entregables o subproductos para que se ajusten a la arquitectura ITS específica definida para cada servicio, en cuanto a componentes e interacción requerida. Esto garantizará la estandarización deseada y permitirá la futura interoperabilidad.

- Realizar pruebas de operación y ajustes: una vez desarrollado el servicio, se deben realizar pruebas de operación antes de proceder con su implementación en la infraestructura de la ciudad, con el fin de ajustar detalles relevantes.

## CONCLUSIONES

Una ciudad que realiza una implementación incremental de su portafolio de servicios de movilidad requiere una arquitectura ITS que permita la integración e interoperabilidad de los nuevos servicios con la plataforma de tecnología y servicios existente. Tener una arquitectura ITS que reconoce sus condiciones particulares le permite a la administración proponer y desarrollar servicios en una perspectiva de mediano y largo plazo, e implementarlos gradualmente en orden de prioridad y de manera organizada. Diseñar dicha arquitectura ITS usando una metodología adecuada para su formulación es un aspecto clave que garantiza la inclusión en ella de las buenas prácticas recomendadas por instituciones y países con experiencia comprobada y resultados en el área de la movilidad inteligente.

El uso de estándares como la ISO 14813 permite identificar los requisitos necesarios para una adecuada arquitectura ITS y los servicios y paquetes de servicios que se considera importante implementar. Sin embargo, la aplicación de este tipo de normas no es suficiente cuando se requiere proponer una arquitectura ITS para una ciudad, región, o país, y desarrollar servicios relacionados, ya que no brinda herramientas metodológicas pertinentes que sirvan para la especificación de las arquitecturas ITS de cada uno de los servicios seleccionados. En estos casos, es muy conveniente acudir a las arquitecturas ITS de referencia a nivel internacional, como la arquitectura americana (ARC-IT) y la arquitectura europea (FRAME), las cuales brindan herramientas –software, diagramas, especificaciones de interacción, etc.–, que facilitan este tipo de procesos.

Con la aplicación de la metodología para formular una arquitectura ITS para una ciudad intermedia colombiana desarrollada en este trabajo, fue posible diseñar una arquitectura ITS particular para Popayán y, con base en ella, usando una tecnología habilitadora para la implementación de ITS (IoT), se llevó a cabo el diseño de dos servicios de movilidad relacionados con la mejora del control del servicio de transporte público y la medición del tráfico.

Luego, con ayuda de una metodología de desarrollo en IoT se desarrolló el primero de dichos servicios. El desarrollo de ese servicio (PT01) facilita el futuro proceso de implementación, buscando una integración futura con otros servicios desarrollados basados en la misma arquitectura ITS. Sin embargo, se debe considerar que, aunque el desarrollo de servicios de movilidad es un paso significativo, su proceso de implementación es muy importante para evaluar si la arquitectura desarrollada para la ciudad cumple con lo requerido y permite obtener servicios realmente integrados e interoperables.

El proyecto piloto del servicio de Seguimiento de vehículos de transporte público se desarrolló con éxito. Considerando los resultados obtenidos, se puede afirmar que la prueba de concepto fue exitosa, ya que cumple con los requisitos identificados, se basa en una arquitectura ITS implementada a través de tecnología IoT, y cumple con el presupuesto establecido para el dispositivo ubicado en el vehículo. Cabe anotar que el piloto del servicio implementado es simplemente una prueba, para un solo vehículo, si se quisiera realizar la implementación del servicio en una de las empresas de transporte público (que puede tener entre 80 y 270 vehículos) o en toda la flota de vehículos de la ciudad (alrededor de 637 vehículos), debería analizarse muy detalladamente el escalamiento del proyecto y determinar los costos de desarrollo y operación mensual.

Aunque los resultados del servicio desarrollado son positivos –y usa elementos tecnológicos recientemente fabricados que permiten reducir los tiempos transcurridos entre medidas de ubicación del vehículo y reducir los costos de implementación–, tiene aspectos por mejorar. Entre las oportunidades de mejora más significativas se encuentra la seguridad que se requiere, tanto en la aplicación web, como en el acceso a los dispositivos (tarjeta microcontrolada), y la necesidad de un dispositivo que permita la conexión WiFi de la tarjeta microcontrolada a Internet, ya que esto incrementa los gastos de operación y el consumo de energía necesario para prestar el servicio.

Con el trabajo desarrollado en éste proyecto de investigación y las buenas prácticas y experiencias obtenidas, fue posible proponer un proceso claro de desarrollo de servicios de movilidad en ciudades intermedias, el cual puede ser aplicable a nivel nacional e internacional, en contextos de ciudades con características no necesariamente muy similares. Como trabajo futuro se propone implementar el servicio desarrollado en la ciudad de Popayán, con el apoyo de las autoridades del gobierno local y se las empresas de transporte público.

Para finalizar, cabe indicar que la información consignada en este capítulo puede ser complementada con las publicaciones de este proyecto [70], [73] – [76]. Para quienes su mayor interés sea el detalle de la aplicación de la metodología para diseñar la arquitectura ITS de la ciudad de Popayán, el detalle de la aplicación de dicha metodología de desarrollo para el servicio de seguimiento al vehículo de transporte público o los entregables de cada una de las etapas, se recomienda revisar, respectivamente, los ANEXOS G, H e I de [70].

## REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud, *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*, Ginebra, Suiza: OMS, 2015
- [2] Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses - Grupo Centro de Referencia Nacional Sobre Violencia, *Forensis 2017: datos para la vida*. Bogotá, Colombia: ICMLCF, 2018.
- [3] Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses - Grupo Centro de Referencia Nacional Sobre Violencia. *Forensis 2016: datos para la vida*. Bogotá, Colombia: ICMLCF, 2017.
- [4] Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses - Grupo Centro de Referencia Nacional Sobre Violencia. *Forensis 2015: datos para la vida*. Bogotá, Colombia: ICMLCF, 2016.
- [5] *Inrix Global Traffic Score Card 2018*, disponible: <http://inrix.com/scorecard/>
- [6] *Inrix Global Traffic Score Card 2017*, disponible: <http://inrix.com/scorecard/>
- [7] A.H. Chow, A. Santacreu, I. Tsapakis, G. Tanasaronond, y T. Cheng, “Empirical assessment of urban traffic congestion,” *Journal of advanced transportation*, vol. 48, no. 8, pp. 1000-1016, 2014.
- [8] United Nations Commission on Science and Technology for Development [UNCTAD], *Issues paper on smart cities and infrastructure* [draft], disponible: [http://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/CSTD\\_2015\\_Issuespaper\\_Theme1\\_SmartCitiesandInfra\\_en.pdf](http://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/CSTD_2015_Issuespaper_Theme1_SmartCitiesandInfra_en.pdf)
- [9] S. Dirks, C. Gurdgiev, y M. Keeling, M., *Smarter cities for smarter growth: How cities can optimize their systems for the talent-based economy* [en línea], disponible: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2001907](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2001907)
- [10] T. Okuda, S. Hirasawa, N. Matsukuma, T. Fukumoto, y A. Shimura, “Smart mobility for smart cities”, *Hitachi Review*, vol. 61, no. 3, pp. 141,146, 2012, May
- [11] C. Benevolo, R. Dameri, y B. Auria, “Smart mobility in smart city action taxonomy, ICT intensity and public benefits,” en *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*, vol. 11, pp. 13–28, Cham, Suiza: Springer
- [12] R. Giffinger, C. Fertner, H. Kramar, R. Kalasek, N. Milanović, y E. Meijers, *Smart cities: Ranking of European medium-sized cities*. Viena, Austria: ViennaUniversity of Technology, 2007.

- [13] D. Washburn, U. Sindhu, S. Balaouras, R. Dines, N. Hayes, y L. Nelson, *Helping CIOs understand “smart city” initiatives: Defining the smart city, its drivers, and the role of the CIO*, Cambridge, MA: Forrester Research
- [14] ISO/IEC JTC 1, Information technology, *Smart cities* [preliminary report], Ginebra, Suiza, ISO/IEC, 2014.
- [15] V. Busher, L. Doody, M. Webb, y C. Aoun, *Urban mobility in the smart city age*, Londres, UK: Arup, The Climate Group & Schneider Electric, 2014.
- [16] M. Martínez [Dir.], “Movilizando el transporte con tecnología”, *RCT, Revista Colombiana de Telecomunicaciones*, vol. 17, no. 57, pp. 1-68, 2010.
- [17] IBM, *Building a smarter transportation management network* [white paper], disponible: [https://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter\\_cities/solutions/infrastructure\\_solutions/](https://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter_cities/solutions/infrastructure_solutions/)
- [18] *IEEE recommended practice for architectural description of software intensive systems*, IEEE Standard 1471-2000, 2007
- [19] *Systems and software engineering — Architecture description*, ISO/IEC/IEEE 42010, 2011
- [20] European Comission, *Intelligent transport systems in action*, Luxemburgo: European Union, 2011
- [21] *Intelligent transport systems—Reference model architecture(s) for the ITS sector*, ISO 14813-1, 2015
- [22] *Intelligent transport system meets IoT to promote smart, scalable and safe urban mobility* [en línea], disponible: <https://www.technavio.com/blog/intelligent-transport-system-iot-promote-smart-safe-urban-mobility>
- [23] T. Bojan, U. Kumar, y V. Bojan, “An Internet of things based intelligent transportation system,” en *2014 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pp. 174–179, 2014.
- [24] J. Sherly, y D. Somasundareswari, “Internet of things based smart transportation systems,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 7, pp. 1207-1210, 2015
- [25] Intel Corp. *Building and intelligent transportation system with the Internet of things*, 2014.
- [26] K. Vivek, K. Prashant, y C. Norattam, “An intelligent transportation systems architecture using wireless sensor networks,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 22-26, 2011.
- [27] D. Gascón, *Redes de sensores inalámbricos, la tecnología invisible* [en línea], 2010. Disponible en <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>
- [28] L. Mainetti, L. Patrono, y A. Vilei, “Evolution of wireless sensor networks towards the Internet of things: A survey, en: *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2011 19th International Conference On*, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2008.03.002>

- [29] A. Zanella, S. Member, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, y M. Zorzi, “Internet of things for smart cities,” *IEEE Internet of Things*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- [30] R. Malekian, K. Wu, K. Steenhaut, y N. Ye, “Guest editorial introduction to the special issue on Internet of things and sensors technologies for intelligent transportation systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 10, pp. 2798–2801, Oct. 2017. doi:10.1109/TITS.2017.2753298
- [31] F. Carrez [Ed-], *IoT: A Internet of things architecture: Final architectural reference model for the IoT v3.0*, UniS, , deliverable D1.5, 2013.
- [32] A. Bahga y V. Madisetti, *Internet of Things*, Himayatnagar, India: Universities Press, 2014.
- [33] Infocomm Media Development Authority - Singapore Government, *Internet of Things* [en línea], disponible: <https://www.imda.gov.sg/-/media/imda/files/industry-development/infrastructure/technology/internetofthings.pdf?la=en>
- [34] P. Fremantle (2014). A reference architecture for the Internet of Things [en línea], disponible: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20158.89922>
- [35] J. Green (2014, junio), *The Internet of Things Reference Model* [en línea], disponible: [http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT\\_Reference\\_Model\\_White\\_Paper\\_June\\_4\\_2014.pdf](http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf)
- [36] I. Ganchev, J. Zhanlin, y M. O'Droma, “A generic IoT architecture for smart cities,” en *25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communities Technologies (ISSC 2014/CICT 2014)*, pp. 196–199, 2014. doi:10.1049/cp.2014.0684
- [37] V. Mayer-Schönberger, y K. Cukier, *Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think*. Londres, UK: John Murray, 2013.
- [38] Lee, I. (2017). Big data: Dimensions, evolution, impacts, and challenges. *Business Horizons*, 60(3), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.01.004>
- [39] *National ITS Architecture* [en línea]. Disponible: <http://local.iteris.com/arc-it/>
- [40] *European Intelligent Transport Systems (ITS) framework architecture* [en línea]. Disponible: <http://frame-online.eu/>
- [41] *ITS Japan Organization* [en línea]. Disponible: <http://www.its-jp.org/english/>
- [42] *ITS Association of Malaysia* [en línea]. Disponible: <http://www.itsmalaysia.com.my/content.php>
- [43] *Intelligent transport systems*, ISO TC204. 1992
- [44] *CEN/TC 278 Intelligent transport systems* [en línea]. Disponible: <https://www.itsstandards.eu/tc278>
- [45] *Terms of Reference for Technical Committee (TC) Intelligent Transport Systems (ITS)*, en línea. Disponible: <https://portal.etsi.org/TBSiteMap/ITS/ITSToR>

- [46] Z. Bělinová, P. Bureš, y P. Jesty, “Intelligent transport system architecture: Different approaches and future trends,” en: J. Düh, H. Hufnagl, E. Juritsch, R. Pfliegl, H.K. Schimany, y H. Schönegger [Eds.], *Data and mobility: Advances in intelligent and soft computing*, vol. 81. Berlin-Heidelberg, Alemania: Springer.
- [47] *Arquitectura nacional ITS de Colombia* [en línea], 2010. Disponible en: <http://www.consysyec.com/colombia/web/>
- [48] K. Banse y L. Herrera, “Importancia del entendimiento de las premisas y etapas de estudios y diseños ITS para la implementación de proyectos exitosos,” *Revista Andina Traffic*, vol. 12, pp. 13-15, 2017.
- [49] Ministerio de Transporte, Taller nacional sobre políticas nacionales integradas y sostenibles de logística y movilidad [en línea]. Disponible en: <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?id=4765>
- [50] *Ley 1450 de 2011*, República de Colombia.
- [51] *Decreto 2060 de 2015*, Presidencia de la República de Colombia.
- [52] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), *Proyecto CO-L1111, Apoyo a la implementación de la Política nacional de seguridad vial*. Disponible: <https://www.iadb.org/es/project/CO-L1111>
- [53] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), *Proyecto CO-L1111, documentos, informe final de evaluación de programa*. Disponible: <https://www.iadb.org/Document.cfm?id=EZSHARE-990665562-11>
- [54] *Decreto 718 de 2018*, Ministerio de Transporte / Agencia Nacional de Seguridad Vial, República de Colombia
- [55] M. Carranza, “Dynamic assignment of traffic lights plans as a strategy for reducing vehicle congestion,” en *MOVICI - MOYCOT 2018: Movilidad Urbana en la Ciudad Inteligente*, 2018. Disponible: [https://minas.medellin.unal.edu.co/gruposdeinvestigacion/gaunal/imagenes/imagenes/Eventos/MOVICI\\_MOYCOT/sesion3/4-Mauricio-Carranza.pdf](https://minas.medellin.unal.edu.co/gruposdeinvestigacion/gaunal/imagenes/imagenes/Eventos/MOVICI_MOYCOT/sesion3/4-Mauricio-Carranza.pdf)
- [56] *Sistema estratégico de transporte público de pasajeros para la ciudad de Popayán* [CONPES 3602], Bogotá, Colombia: DNP, 2009.
- [57] *Seguimiento a los sistemas de transporte público (SITM-SETP). ajuste del perfil de aportes y recomposición de componentes* [CONPES 3833], Bogotá, Colombia: DNP, 2015.
- [58] Steer Davies Gleave Ltd. *Plan de movilidad para el municipio de Popayán*, Popayán, Colombia: Movilidad Futura SAS, 2015
- [59] J. Nuñez-Florez, “El SAE de Transmilenio: sistema de gestión de flotas para el transporte masivo de Bogotá,” *Revista Carreteras*, no. 140, pp.139-145, 2005
- [60] K. Qureshi y A. Abdullah, “A survey on intelligent transportation systems,” *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 15, no. 5, pp. 629–642, 2013. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.15.5.11215>

- [61] S. An, B. Lee, y D. Shin, “A survey of intelligent transportation systems,” en *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, 2011, pp. 332–337. doi:10.1109/CICSyN.2011.76
- [62] N. Buch, S. Velastin, y J. Orwell, “A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic,” *IEEE Transactions on ITS*, vol. 12, pp. 920-939, 2011.
- [63] A. Silla, L. Leden, P. Rämä, J. Scholliers, M. Van-Noort, y D. Bell, “Can cyclist safety be improved with intelligent transport systems?,” *Accident Analysis & Prevention*, vol. 105, pp. 134-145. 2017.
- [64] T. Yokota, y R. Weiland, “ITS system architectures for developing countries,” World Bank, Washington, DC, Rep. 35681, 2004.
- [65] U.S. Department of Transportation, *Regional ITS architecture guidance: Developing, using, and maintaining an ITS architecture for your region* [en línea]. Disponible: <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/regitsarchguide/2procoverview.htm>
- [66] P.H. Jesty, y R.A.P Bossom, “Using the FRAME architecture for planning integrated intelligent transport systems,” en *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, 2011, pp. 370–375. doi:10.1109/FISTS.2011.5973610
- [67] A. Pachón, T. Liscano, y D. Montoya, “Service development model in ITS for Colombian cities”, *Sistemas & Telemática*, vol. 13, no. 34, pp. 31-48, 2015.
- [68] L. Giraldo, C. Marín, y R. Bolaños, “Design of an architectural model suitable for metropolitan west central area in Colombia,” en *23rd ITS World Congress*, Melbourne, Australia, October 2016.
- [69] T. Bush (2016), *PESTLE analysis: Everything you need to know*, disponible en: <https://pestleanalysis.com/pestle-analysis-everything-you-need-know/>
- [70] R. Salazar. “Desarrollo de servicios de movilidad para ciudades intermedias de un país en desarrollo, basado en una arquitectura de un sistema inteligente de transporte utilizando el Internet de las cosas,” tesis de maestría, Universidad Icesi: Cali, Colombia, 2018
- [71] ITU-T Focus Group on Smart Sustainable Cities (2014), An overview of smart sustainable cities and the role of information and communication technologies [ITU, FG-SSC], International Communications Union, Ginebra, Suiza.
- [72] D. Slama, F. Puhlmann, J. Morrish, y R.M. Bhatnagar. *Enterprise IoT: Strategies and best practices for connected products and services*, Springfield, MO: O’Reilly.
- [73] R. Salazar y A. Pachón. “Design of urban mobility services for an intermediate city in a developing country, based on an intelligent transportation system architecture,” en *Workshop on Engineering Applications*, Cham, Suiza: Springer, 2018, pp. 183-195.
- [75] R. Salazar y A. Pachón. “Public transport vehicle tracking service for intermediate cities of developing countries, based on ITS architecture using Internet of things (IoT),” en *21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2018, pp. 183-195.

- [76] R. Salazar y A. Pachón. “Methodology for design of an intelligent transportation system (ITS) architecture for intermediate Colombian city,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 21, no. 1, pp. 47-60, 2019



# MÉTODOS AOA, PDOA E HÍBRIDOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN TRANSMISOR NO COLABORATIVO MEDIANTE LANZAMIENTO DE RAYOS SOBRE UN MOTOR DE JUEGOS

William Arleth Cruz López, MSc.

Andrés Navarro Cadavid, Ph.D

## **Citación**

W. Cruz y A. Navarro, “Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos,” en *Bitácoras de la maestría: vol. 1. Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión*, Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2019, pp. 85-127.



---

# RESUMEN

---

Las técnicas para la localización en redes inalámbricas han sido estudiadas con fines comerciales, militares y educativos, entre otros. Tradicionalmente, estos métodos se basan en medidas como la potencia de señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*), la diferencia de potencia de llegada (PDOA, *Power Difference of Arrival*), los tiempos de llegadas de la señal (TOA, *Time of Arrival*), la diferencia de tiempos de llegadas (TDOA, *Time Difference of Arrival*) y el ángulo de llegada (AOA, *Angle of Arrival*). Estos parámetros pueden ser obtenidos con medidas de señal por parte de sensores o por modelado del canal. En este documento se muestra una nueva propuesta de localización que busca disminuir la cantidad de sensores involucrados en el cálculo de la ubicación de un transmisor no colaborativo en entornos exteriores, basándose en herramientas computacionales precisas y poderosas como son los motores de juegos. El modelado de canal se basa en el método de lanzamiento de rayos (*ray launching*) y se utiliza un motor de juegos como herramienta de simulación. Posteriormente, con la información de modelado de canal se realiza un análisis orientado a la localización de un transmisor no colaborativo en escenarios exteriores. Los parámetros de la señal y las técnicas de localización se basan en información AOA y PDOA. Se desarrollan algoritmos de localización AOA, PDOA e híbridos con información de dichos parámetros, y se evalúa su desempeño. Finalmente, se evidencia que el uso de la técnica de lanzamiento de rayos permite obtener mejores resultados que los métodos tradicionales de modelado de canal para localización con configuraciones híbridas.

## INTRODUCCIÓN

La localización de transmisores es una técnica que se ha investigado desde los años cuarenta, cuando surgieron sus primeras aproximaciones teóricas [1]. En sus inicios fue impulsada por organismos militares; posteriormente, en los años noventa, con el impulso de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, Federal Communications Commission) se expandió hacia la ubicación de móviles celulares de usuarios en situaciones de emergencia [2]; actualmente, en los sistemas de comunicación moderna, la localización de transmisores se puede observar en aplicaciones como: publicidad basada en ubicación, videojuegos, realidad aumentada, búsqueda y rescate de sobrevivientes en situaciones de desastre, redes de sensores inalámbricos [3], sistemas de transporte inteligente y diseño y gestión de redes inalámbricas, entre otros. Las técnicas de localización en redes inalámbricas son temas activamente estudiados, tanto para localización cooperativa –donde el móvil comparte información que permite determinar su ubicación–, como para localización no colaborativa, basada en características electromagnéticas de la señal [4].

La localización de transmisores no colaborativos en un entorno inalámbrico ha sido una herramienta explotada principalmente en situaciones de emergencia, entornos académicos y con fines militares y gubernamentales. En esto último, la localización se realiza para aplicaciones de ubicación, tanto de transmisores ilegales o “piratas” –quienes transmiten sin contar con la respectiva licencia–, como para transmisores licenciados que transmiten más allá de la potencia permitida, en algunos casos interfiriendo o interrumpiendo el servicio de otros transmisores. Determinar la ubicación del transmisor “pirata” le permite a las entidades reguladoras del espectro radioeléctrico (ERE) tomar las medidas correspondientes, de acuerdo con las leyes del país.

Las campañas de monitoreo de entes reguladores del ERE suelen ser muy costosas, debido a la gran cantidad de sensores y recursos humanos involucrados en ellas. Si bien existen estrategias para localización de transmisores no colaborativos, su exploración no ha sido suficiente como para reducir la cantidad de sensores y así disminuir sus costos de implementación. He ahí la importancia de fomentar su desarrollo.

Los avances en localización de transmisores no colaborativos son bienvenidos en los países donde se fomenta el monitoreo y control del ERE, es así como en Colombia, el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones (MinTIC) y la Agencia Nacional del Espectro (ANE), las entidades encargadas de sancionar a quienes hacen uso indebido del ERE, se pueden beneficiar significativamente del impulso a estas tecnologías.

Los estudios de localización basados en dirección de llegada están en auge, tanto así que la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) cuenta con una rama particular de estudio: la radiogoniometría, cuyo objetivo es determinar la línea de marcación (LOB, *Line of Bearing*) de una fuente de radiaciones electromagnéticas utilizando las propiedades de propagación de las ondas [5].

Asimismo, los avances tecnológicos y el continuo incremento de la capacidad computacional permiten abordar el problema de localización buscando: disminuir la cantidad de sensores involucrados en la localización y mejorar la precisión al determinar una ubicación. Dado el potencial de tecnologías y el enfoque en reducción de costos, la principal motivación de esta investigación es desarrollar una herramienta software que permita localizar un transmisor no colaborativo y disminuir con ello el número de sensores involucrados en la localización.

Los organismos gubernamentales reguladores del ERE y las fuerzas militares son los mayores impulsores de soluciones para la localización de transmisores no colaborativos [6], [7]. Como se dijo, las entidades reguladoras del ERE demandan sistemas de ubicación de transmisores ilegales que puedan causar interferencia o interrumpir los servicios de transmisores legales, sistemas que deben proporcionar alta precisión y rápido procesamiento. Los sistemas tradicionales de localización derivados de modelado de canal asumen la existencia de línea de vista (LOS, *Line of Sight*) entre el transmisor y los receptores [8]–[10], pero en entornos reales esta situación rara vez se da. En un entorno urbano real, la mayoría de las componentes que involucra una comunicación se hacen mediante señales que se encuentran sin línea de vista entre el transmisor y el receptor, resultantes de reflexiones, dispersiones y difracciones de las señales, por lo tanto, asumir la existencia de una línea vista y basar el modelado de canal en ella misma no es aplicable en entornos urbanos reales para fines de localización. En entornos urbanos exteriores, por consiguiente, el modelado de canal debe realizarse con técnicas apropiadas a ellos, tales como el lanzamiento de rayos [11], método que tiene en cuenta las características del terreno, los dispersores presentes en el ambiente y los materiales de los objetos, entre otros [12].

Los motores de juegos presentan gran precisión en el modelado de ambientes en tres dimensiones (3D), rápido procesamiento y manejo de memoria, además cuentan con el poder de las tarjetas gráficas (GPU, *Graphics Processor Unit*). Su uso para modelado de canal ha presentado buenos resultados y se constituye en una muy buena opción, gracias a la combinación de la precisión, el manejo de memoria y el poder de las tarjetas gráficas [13]–[15].

La combinación de lanzamiento de rayos y motores de juegos permite obtener información de AOA, PDOA, TDOA y una respuesta impulsiva del canal, características del canal que pueden ser explotadas hacia la localización de transmisores no colaborativos.

Este proyecto busca presentar una solución a los altos costos que implica el uso de la gran cantidad de sensores involucrados para localización en campañas de monitoreo y control del ERE, mediante el uso de técnicas de análisis de información de AOA y PDOA provenientes de modelado de canal con métodos de lanzamiento de rayos, aplicadas a ubicación de un transmisor no colaborativo en entornos exteriores, sobre un motor de juegos, e impulsar el estudio de técnicas de lanzamiento de rayos en entornos académicos y comerciales.

El problema principal que aborda este proyecto es la falta de un algoritmo de localización de un transmisor no colaborativo enfocada al uso de pocos sensores.

Cabe mencionar que la localización de transmisores no colaborativos en entornos urbanos es una técnica innovadora sobre la que se ha investigado poco a nivel internacional, menos aún (si no nada) aprovechando el uso de un motor de juegos combinado con modelos de lanzamiento de rayos, lo que habla de la importancia de este proyecto.

El objetivo general del proyecto fue definido como “Diseñar e implementar algoritmos para localización de un transmisor no colaborativos en entornos exteriores basados en lanzamiento de rayos mediante técnicas AOA, PDOA y combinaciones híbridas de ellas, sobre un motor de juegos”, y como objetivos específicos: diseñar dichos algoritmos, determinar los escenarios de simulación que permitan la ejecución en un motor de juegos del método lanzamiento de rayos, realizar las simulaciones de modelado de canal en un motor de juegos para escenarios exteriores mediante el método de lanzamiento de rayos; y evaluar el desempeño de los algoritmos diseñados.

## MARCO TEÓRICO

En 1927, la oficina de correos británica planteó un sistema de localización de emisores interferentes que consistía en una antena *loop* empotrada al techo de un vehículo que se giraba mediante un volante, con el fin de encontrar la dirección de máxima potencia recibida [16]. En 1947 se iniciaron los primeros estudios teóricos orientados a la localización pasiva de transmisores con fines militares [1]. Con el auge de las comunicaciones móviles celulares y la intervención de la FCC, en 1996, se promovieron los servicios de localización de usuarios en emergencia, conocidos como 911 mejorado (E-911, *Enhanced-911*) [2], enfocados en robustecer las capacidades del teléfono móvil. En 2002, los estados miembros de la Unión Europea implementaron el E-112 (*Enhanced-112*), número único de emergencias europeo, mediante la Directiva 2002/22/EC [17], la cual establece que cada red de acceso debe ser capaz, no solo de reconocer llamadas de emergencia, sino también la información de localización relacionada ella—; asimismo, el proyecto 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), mediante la TS 22.071-3GPP [20] presentó los requerimientos básicos para una definición completa de localización en la capa de servicio, la cual establece que debe ser posible identificar y reportar en un formato estándar la ubicación presente del terminal de usuario, y hacer que esta información esté disponible para el usuario, el operador de red, el proveedor del servicio, los proveedores de servicios de valor agregado y las operaciones internas de la red móvil terrestre. Hoy en día, con el continuo impulso al desarrollo de dispositivos inalámbricos, las aplicaciones de localización de transmisores se ven en entornos más cotidianos y se proyecta que sus beneficios contribuyan en el diseño y optimización de redes de quinta generación (5G) [19].

Generalmente, las técnicas de localización convencionales se basan en las medidas de uno o más de los parámetros de la señal, como son: la dirección de llegada (AOA), la potencia de señal recibida (RSS o PDOA) y el tiempo de propagación de la señal (TOA o TDOA) [20].

Las técnicas basadas en AOA miden directamente la dirección de propagación del frente de onda de la señal entrante. Comúnmente, se requiere un arreglo de antenas que mide la diferencia en fase (tiempo) de la señal entre los elementos del arreglo de antenas (la diferencia de fases es convertida en un ángulo) [20]. La precisión del sistema depende de la propagación de la señal y de la distancia entre transmisor y receptor. Sus resultados son bastante precisos en entornos

con LOS, pero su rendimiento decae en entornos sin línea de vista (NLOS, *Non Line of Sight*). Actualmente, los estudios de AOA han empezado a migrar a estudios de línea de marcación, una medida de LOB consiste en la dirección de un punto a un objetivo [21], donde se tiene en cuenta el ángulo de elevación.

La potencia de llegada (RSS/PDOA), por su parte, es un método económico para localizar un transmisor debido a que no exige hardware adicional en el receptor de comprobación técnica. La potencia de una señal radioeléctrica puede calcularse mediante modelos de propagación cuando se conocen la potencia transmisora y el trayecto de propagación, especialmente si se utilizan sistemas de comunicaciones inalámbricas normalizados. Ahora bien, cuando no se conoce la potencia transmisora, se puede localizar el transmisor calculando la PDOA en pares de receptores, valor que corresponde a pérdidas de propagación distintas desde el transmisor hacia los diferentes receptores. La técnica de PDOA se basa en que la distancia entre dos nodos puede ser estimada por la medida de energía de la señal al final de uno de ellos. Esta técnica basada en distancias requiere de al menos tres nodos de referencia para determinar una localización en dos dimensiones y usa el método de triangulación para determinar la ubicación de la unidad móvil [21], [22].

La localización mediante tiempos de propagación de la señal puede estar basada en TOA o en TDOA. TOA permite localizar el dispositivo móvil calculando el tiempo de llegada desde un móvil a más de una estación base, pero requiere de una sincronización entre ellos [23]; por el contrario, la técnica basada en TDOA no requiere sincronización entre estaciones base y el dispositivo móvil, pero sí entre las estaciones base [23].

Estos parámetros utilizados tradicionalmente con fines de localización se obtienen usando sensores especializados en su obtención o mediante el modelado del canal de forma determinística. El modelado del canal es un proceso que permite apreciar el posible comportamiento de la señal mediante mecanismos de interacción entre la onda radio y el ambiente [24] y puede obtenerse de manera empírica, empleando campañas de medición, o mediante el empleo de estimación de modelos determinísticos.

Uno de estos modelos determinísticos es el trazado de rayos [25], [26], el cual es usado para simular el canal de propagación y permite distinguir entre diferentes caminos de propagación [27] y así estimar las características más importantes del canal en banda estrecha, banda ancha, espacial y temporal [26]–

[28]. Además, permite identificar los parámetros individuales representativos de los caminos de propagación, tales como: la intensidad de señal recibida, el tiempo de retardo de arribo, la dirección de partida, la dirección de llegada y la matriz polarimetría [29].

La técnica de trazado de rayos se divide en dos tipos de métodos: ray tracing [30], el método de imágenes; y ray launching, el método de lanzamiento de rayos o fuerza bruta [11]. Comúnmente, el primero se utiliza en entornos de geometrías con baja complejidad y un número pequeño de reflexiones, mientras que el lanzamiento de rayos se utiliza en entornos con geometrías más complejas, donde pueden considerarse, tanto reflexiones, como difracciones. Lo anterior explica por qué este último es ampliamente utilizado para ambientes urbanos complejos en condiciones punto a multipunto.

Un motor de juegos es un sistema diseñado para la creación de video juegos e Incluye: un motor de renderizado; un motor de físicas, para la detección de colisiones; y un eficiente sistema de manejo de memoria. Los motores de juego son eficientes en la implementación de algoritmos de trazado de rayos gráfico y usan el poder de las tarjetas gráficas para el renderizado de ambientes. El motor de físicas provee la simulación de ciertos sistemas físicos, como dinámica de cuerpos rígidos, cuerpos blandos y fluidos, usados en los video juegos, el cine y la computación gráfica. Asimismo, los motores físicos están destinados para implementar óptimamente efectos ópticos, tales como reflexiones, refracciones y difracciones. Los motores de juegos pueden también ser utilizados en la simulación de entornos reales para permitir al usuario experimentar tareas y misiones con fines educativos y científicos (juegos serios), una aplicación en tareas diferentes a aquellas para las que fueron originalmente diseñados [13], [31]–[33].

## ESTADO DEL ARTE

Con el fin de establecer un punto de partida alrededor del conocimiento generado en el campo de la ubicación de transmisores basados en parámetros de la señal, se utilizó la propuesta de Kitchenham y Charters [34] para la construcción de la revisión sistemática de la literatura. La clasificación de trabajos a analizar se basó en investigaciones de localización de transmisores basadas en RSS, PDOA, AOA, combinaciones híbridas de los mismas y técnicas basadas en trazado de rayos orientados a localización.

La razón para dividir los estudios de RSS y PDOA –ambos basados en los niveles de potencia recibidos–, es que a pesar de ser similares tienen diferencias importantes: en el primero, la potencia de la señal radioeléctrica asume el conocimiento de la potencia transmisora y el trayecto de propagación, y es usado especialmente para comunicaciones inalámbricas normalizadas; en el segundo, este tipo de información no está disponible, por lo que solo se trabaja con el nivel de potencia recibido y las diferencias entre pares de sensores que se puedan establecer.

### **RSS**

Ureten, Yongacoglu y Petriu [35] realizaron un estudio de localización por simulación basado en PDOA y algoritmos de máxima verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), en el que usaron más de veinte sensores. Sus resultados fueron evaluados con la cota inferior de Cramer-Rao (CRLB, *Cramer-Rao Lower Bound*) para entornos con desvanecimiento por sombra.

Lohrasbipeydeh, Gulliver y Amindavar [36] evaluaron, vía simulación, métodos para localización con conocimiento y desconocimiento de la información de la potencia de transmisión del transmisor y para diferentes valores del exponente de pérdidas de propagación de camino. Su método se compara con el CRLB, sin embargo, aunque presenta un buen desempeño, requiere de alrededor de nueve sensores para un área pequeña de 30x30 metros.

En el estudio de Bohidar, Behera y Tripathy [37], a pesar de no ser de localización, se presentan criterios de rendimiento de diferentes sistemas de posicionamiento basados en técnicas PDOA, con evaluación del costo y consumo de potencia.

Beck, Baxley y Ma [38] propusieron la aplicación de métodos de varianza de mínimos cuadrados (VLS, *Variance Least Squares*) para adaptar algoritmos mínimos cuadrados no lineales (NLS, *Nonlinear Least Squares*). Lograron proximidad con CRLB, pero usando una gran cantidad de sensores en un área de 50x50 metros. Su trabajo no se validó en escenarios reales, sino solo en simulación.

### **PDOA**

Sackenreuter, Hadaschik, Fassbinder y Mutschler [39] evaluaron técnicas de localización basadas en la diferencia media, regresión lineal y clasificación

múltiple de la señal para ubicación de emisores en una red de sensores, y observaron su desempeño mediante CRLB. Sin embargo, es un estudio limitado a una dimensión.

Engebraten [40] expuso, mediante simulación, la utilización de vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) con fines de localización, mostró programación sobre GPU y evaluó la precisión. Sin embargo, su trabajo está más orientado a entornos LOS.

Jackson, Wang e Inkol [41] evaluaron varios métodos de geolocalización de transmisores y el número de sensores PDOA (por ejemplo, muestran que la ganancia obtenida al aumentar sensores decrece entre seis y ocho sensores no colaborativos). Sin embargo, en el entorno donde se realiza su estudio, el uso de pocos sensores muestra como resultado una distancia de error promedio de 500 metros o más.

## AOA

Wielandt [42] presentó una investigación de algoritmos de ubicación basados en AOA evaluando diferentes tamaños de habitaciones, materiales de las paredes y características del arreglo de antenas para entornos interiores, pero orientada a entornos LOS.

Aghaie y Tinati [43] muestran un entorno con distribución de sensores que se encuentran en LOS y NLOS. Para los cálculos de ubicación eliminan los sensores que se encuentren en NLOS y solo tienen en cuenta la información de los sensores en LOS. Tiene como inconveniente, la gran cantidad de sensores (veinte) usada para realizar su estudio.

Aunque Redondo, Sánchez, Gómez, Betancur e Hincapié [44] no muestran un método de localización de transmisores basados en AOA, cabe destacar sus avances orientados a su implementación.

Grabbe, Hamschin y Douglas [45] se presentan, mediante simulación, un algoritmo que puede usarse para resolver los problemas de correlación de línea de marcación (LOB) para objetivos estacionarios.

Reed, da Silva y Buehrer [46] proveen una solución mediante el uso de *clusters*. Si bien con cinco sensores realizan la simulación de la localización de tres transmisores, su trabajo asume que el canal presenta ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN, Additive White Gaussian Noise) y un escenario con LOS.

Cabe recordar que la propuesta presentada en este documento está orientada a entornos urbanos sin línea de vista y busca usar la menor cantidad de sensores posible para determinar una ubicación, por lo que difiere de los aquí expuestos.

## HÍBRIDOS

Wang, Jackson e Inkol [47] presentan simulaciones de localización basadas en parámetros híbridos utilizando el método ML para un entorno de 1600x1600 metros, y realizan el análisis de dos estimadores de ubicación de transmisores, con el modelo de von Mises para AOA y el modelo de propagación log-normal para la obtención de valores de RSS, y destacan la mejora en precisión de la combinación híbrida de RSS y AOA. Sin embargo, plantean el uso de nueve sensores RSS y cinco AOA que deben ser distribuidos de manera circular rodeando al transmisor que se desea ubicar, y están más orientados a estudios de entornos con LOS.

Chan, Chan, Read, Jackson y Lee [48] evalúan la precisión individual para técnicas basadas en RSS, AOA e híbrido mediante simulación, usando el método de mínimos cuadrados ponderados (WLS, *Weighted Least Squares*), utilizan seis sensores medidos por UAV y presentan resultados orientados a entornos, cercanos a la cota inferior de Cramer-Rao.

Gazzah, Najjar y Besbes mediante simulación estudian los métodos híbridos y proponen dos: con el método de mínimos cuadrados lineales y con aproximación a la máxima verosimilitud [49]. Lo particular de este estudio es que realiza un proceso selectivo de los sensores con mejor comportamiento para ambos métodos, convirtiendo a los métodos en versiones híbrido selectivas (SH, *Selective Hybrid*) de mínimos cuadrados lineales (LLS, *Linear Least Squares*) y máxima verosimilitud aproximada (AML, *Approximate Maximum Likelihood*), de los cuales, el segundo presentó mejor desempeño, aunque con un elevado costo en uso de recursos, en la simulación planteada, usan una estación base y doce sensores para un entorno LOS. En una segunda investigación, estos mismos autores [50] plantean un estudio en entornos NLOS, donde basan la localización del transmisor en el algoritmo de ponderación híbrido selectivo (SHWA, *Selective Hybrid Weighting Algorithm*), que toma los límites angulares desde datos de AOA y métodos de trilateración por parte de sensores RSS; en este caso, se presenta también los problemas de cantidad de sensores involucrados, no validación con medidas de entornos reales y simulación en escenarios no complejos. En un tercer trabajo [51], Gazzah et al., presentan la combinación

de los dos anteriores y logran disminuir a dos estaciones base y siete sensores, pero persisten en los demás problemas citados.

Tomic, Marikj, Beko, Dinis y Orfao utilizan el método WLS y una potencia de transmisor conocida para realizar aproximaciones teóricas [52]. Posteriormente Tomic, Beko y Dinis [53] amplían este estudio utilizando la técnica de relajación de cono de segundo orden (SOCR, *Second Order Cone Relaxation*), aplicada sin tener conocimiento de la potencia de transmisión del transmisor.

Salman, Khan y Kemp [54], por su parte, realizan el estudio teórico del método de mínimos cuadrados lineales ponderados (WLLS, *Weighted Linear Least Squares*), el cual presenta mejor rendimiento que el algoritmo LLS para aplicaciones híbridas AOA/RSS. Sharma y Gulhane [55] presentan una vista general de diferentes métodos de localización, una metodología y un diagrama de flujo para implementaciones híbridas de AOA y RSS para entornos interiores, orientada a localización de múltiples usuarios en entornos interiores con costos razonables y con arquitectura de múltiples antenas.

Cabe destacar que los estudios mencionados en esta sección, que usan simulaciones y planteamientos teóricos, brindan una base para el desarrollo de métodos híbridos de localización basados en RSS y AOA. Si bien los trabajos estudiados brindan una vista general y destacan los beneficios de los métodos de localización híbrida, todavía se ven muy orientados a entornos LOS y presentan una alta cantidad de sensores.

## **TRAZADO DE RAYOS**

Algeier, Thomä, Koch y Thielecke [56] describen métodos para la localización basados en medidas de la respuesta impulsiva del canal (CIR, *Channel Impulse Response*), de las cuales descartan los parámetros de elevación de ángulo de llegada y frecuencia Doppler; sus resultados se presenta y validan con medidas tomadas en campo y utiliza el método de imágenes para el trazado de rayos. Su trabajo tiene un inconveniente que se deriva del método de imágenes para la caracterización del canal radio, dado que la propagación la toma como una representación horizontal en dos dimensiones (2D) del escenario, lo que limita este tipo de trabajos a entornos de interiores y en algunos casos de microceldas [57], y descarta los casos donde los transmisores estén a mayor altura que los receptores o viceversa.

De Groot, Bose, Cooper y Kruse [58] presentan en su estudio un escenario pequeño mediante recopilación de datos AOA, PDOA y TDOA para generar una huella (*fingerprint*) del escenario. Dado que utilizan el trazado de rayos por método de imágenes basado en información en 2D, presentan los problemas citados respecto de este método de imágenes en el párrafo anterior. Además, su planteamiento es menos complejo que el de Algeier et al., [56].

Kupershtein, Wax y Cohen [59] presentan la simulación e implementación de la localización en un entorno *indoor* basado en la CIR y en la comparación de huellas. Haniz et al., [60] realizan una localización orientada a la ubicación de radios ilegales con base en la evaluación de huellas provenientes del estudio de la CIR, limitan su estudio a casos donde el transmisor ilegal se encuentre de uno a dos metros de altura, hacen la simulación mediante software propietario, pero no validan sus resultados.

Cabe resaltar que los trabajos descritos tienen en cuenta más parámetros que AOA y PDOA en sus investigaciones, para lo cual se necesitan instrumentos de medición avanzados, de alto costo, presentes en entornos experimentales, lo que va en contravía de las expectativas de este proyecto de investigación, que busca, mediante la disminución de la cantidad de sensores involucrados en el proceso, disminuir los costos de localización de transmisores no colaborativos.

## **HACIA UN SISTEMA DE LOCALIZACIÓN BASADO EN LANZAMIENTO DE RAYOS**

### **DESCRIPCIÓN DE ESPECIFICACIONES Y SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS**

Una especificación es una guía que permite, tanto la elección de las tecnologías y herramientas adecuadas, como despejar dudas acerca de los requerimientos de los sistemas a diseñar. Para este proyecto las expectativas fueron:

- el diseño de algoritmos de localización de un transmisor no colaborativo con base en técnicas AOA, PDOA y combinaciones híbridas de ellas;
- la definición de los escenarios de simulación que permitan la ejecución en un motor de juegos del método de lanzamiento de rayos;
- las simulaciones de modelado de canal en un motor de juegos para escenarios exteriores mediante el método de lanzamiento de rayos;

- la evaluación del desempeño de los algoritmos diseñados; y
- el diseño e implementación de algoritmos para localización de un transmisor no colaborativo en entornos exteriores, con base en lanzamiento de rayos mediante técnicas AOA, PDOA y combinaciones híbridas de ellas.

Dado el enfoque de este proyecto, las herramientas que se utilicen deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- la información fuente debe provenir de fuentes de uso generalizado;
- el motor de juegos debe permitir la inclusión de propiedades electromagnéticas y características físicas de los materiales que conformen un escenario, el uso de las tarjetas GPU en la detección de una colisión y la compatibilidad con diferentes sistemas operativos, y ser, en lo posible, libre y de código abierto.
- el modelado debe incluir escenarios externos planos, montañosos, urbanos simples y complejos.
- deben permitir el uso de la técnica de lanzamiento de rayos, creación, simulación y entrega de datos; y
- las geometrías usadas en los escenarios deben presentar gran precisión.

## **HERRAMIENTAS SOFTWARE Y HARDWARE**

Las herramientas de trazado de rayos suelen ser aplicaciones costosas y privadas, explotadas tradicionalmente, de forma reservada, por las instituciones que las han creado, lo que limita los avances en este tipo de tecnologías. No es el caso de las aplicaciones de Tami et al., [12], Navarro y Guevara [14] y Navarro et al., [15] –que desde años atrás vienen presentando resultados bastante fiables para el modelado de canal mediante lanzamiento de rayos en entornos exteriores e interiores–, las cuales pueden ser explotadas con fines académicos, lo que facilita los avances en este tipo de técnicas.

Considerando lo anterior –y dado que la herramienta de modelado, aunque forma parte de este proyecto, no es su fin único ni principal, sino un paso en su consecución–, para el modelado del canal se utilizó la herramienta expuesta por Guevara y Navarro [14], pues ella cumple con los requerimientos planteados al inicio de esta sección.

Esta poderosa herramienta de lanzamiento de rayos permite: el estudio

del comportamiento de ondas radio en entornos interiores y exteriores; el modelado del patrón de radiación de antenas; la inicialización de parámetros electromagnéticos de los materiales de los elementos presentes en el escenario; el modelado preciso de geometrías; el uso de GPU mediante un motor de juegos; la visualización clara de resultados; y la entrega de datos adecuada para procesamiento. Además, su lanzamiento de rayos presenta cinco interacciones para entornos exteriores y diez para entornos interiores, lo que es una de sus características más importantes.

La herramienta tiene tres componentes: Java, un software con licencia publica general, que permite la portabilidad entre sistemas operativos y el manejo de memoria, como lenguaje de programación del software de lanzamiento de rayos; jME (*Java Monkey Engine*) V.2 [61], un motor libre, de fuente abierta, con licencia BSD (*Berkeley Software Distribution*), basado en java (lo que permite operar en distintos sistemas operativos), como motor de juegos, cabe mencionar que está desarrollado para usar la tarjeta gráfica, y que su interfaz jME physics2 [62] permite la comunicación entre el motor de físicas basado en ODE (*Open Dynamics Engine*) [63] y jME, por lo que proporciona la implementación física de rayos que permite el desarrollo de la técnica de lanzamiento de rayos aplicada al modelado del canal; y Matlab®, herramienta basada en operaciones de matrices, como software para el análisis de datos.

En cuanto a las herramientas hardware, como equipo de desarrollo se seleccionó un Microway Whisperstation con procesador Intel® Xeon® CPU E5-1650/3.5GHz/6 núcleos/12 subprocesos; 64 GB de memoria RAM (suficiente para evitar el cierre de procesos por insuficiencia de ella en aplicaciones complejas como el lanzamiento de rayos); y una tarjeta gráfica GeForce GT 720/1000 MB (vital por la necesidad de implementar físicas de detección de colisiones).

## **DEFINICIÓN Y DISEÑO DEL SISTEMA**

Se establecieron tres escenarios que permiten estudiar algoritmos de localización PDOA, AOA e híbridos: el primero, un escenario simple con inclinación de suelos y pocos edificios, el segundo, un escenario complejo, un entorno urbano con gran cantidad y variedad de edificios e inclinación en los suelos; y el tercero, una localización basada en medidas un sistema de monitoreo de espectro desarrollado por el grupo de investigación i2t de la Universidad Icesi, para un transmisor en la ciudad de Cali.

## Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos

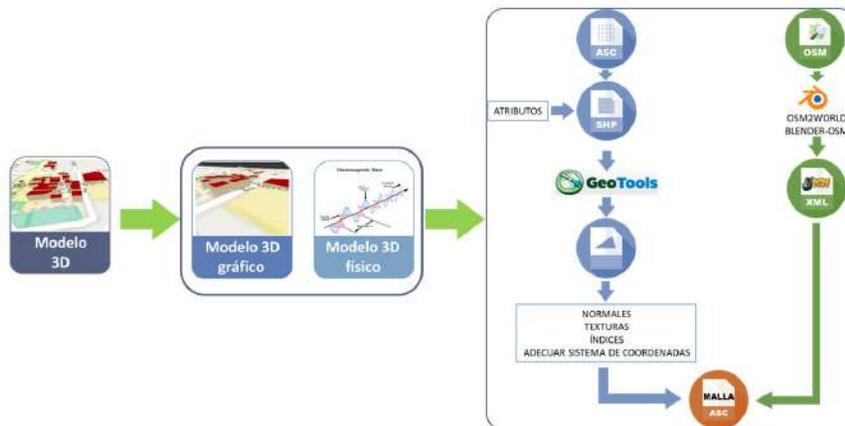
El diseño del sistema (FIGURA 1) consta de tres etapas: la primera corresponde a la presentación de escenarios basados en información cartográfica en modelos 3D; la segunda, al método de lanzamiento de rayos; y la tercera, a los algoritmos de localización. Cada una de las etapas, se describe a continuación.-



**Figura 1. Diseño general del sistema**

### MODELADO 3D DE LOS ESCENARIOS

Para lograr el modelo 3D basado en información cartográfica hay dos opciones de formato de origen (ver la FIGURA 2), las cuales se detallan a continuación.



**Figura 2. Métodos obtención modelo 3D**

La primera opción es el raster ASCII (FIGURA 3a), que incluye datos con información sobre las construcciones y curvas de nivel del terreno, pero no sobre atributos de los elementos, por esto último, el archivo ASCII se transforma a formato Shape [64], para así obtener una geometría Shape 3D a la cual se le agregan los atributos de tipos de materiales –pared, piso o techo– (FIGURA 3b). Una vez se tienen los datos en formato Shape, usando Geotools [65] se puede obtener la identificación de cada polígono plano horizontal, sus vértices en coordenadas espaciales 2D y sus atributos de altura y tipo de polígono (FIGURA 3c). Los polígonos del mismo se pasan por un algoritmo de triangulación de polígonos monótono [66] para obtener la representación en malla (FIGURA 3d), los techos de los edificios se representan con una geometría plana horizontal, las paredes se modelan como geometrías planas verticales comprendidas entre el polígono de techo y el polígono de piso, y las calles se representan con geometrías planas con o sin inclinación. Al archivo de mallas se le agregan las características normales, texturas, índices y se hace la adecuación a un sistema de coordenadas (FIGURA 3e), logrando así el archivo en formato de mallas que lee el lanzador de rayos (FIGURA 3f).

La segunda opción de formato de origen es OpenStreetMap [67] (FIGURA 4a), el cual incluye datos de objetos presentes en un área, que se procesan mediante: OSM2World [68], para los objetos contenidos en un área; y la herramienta en Blender [69] Blender-OSM [70], para su georreferenciación y la obtención de los pisos inclinados. Las características de los materiales vienen dadas por el formato OSM, por lo que no se requiere un posproceso de asociación de objeto y materiales (FIGURA 4b). Desde Blender se exporta el archivo a formato Ogre XML y se procesa en jme2 mediante una clase que adapte el orden de los vértices al orden de vértices establecido para las mallas en el lanzador de rayos (FIGURA 4c). Finalmente, se obtienen el archivo de mallas en el formato adecuado para el cálculo de propagación (FIGURA 4d).

El modelo 3D presenta dos características: un modelo gráfico, que sirve para la presentación de los resultados, y un modelo físico optimizado, útil para los cálculos independiente del modelo gráfico. En el modelo físico se modela el canal radio a través de las interacciones del rayo en el escenario. Una vez obtenido el archivo de mallas adecuado, se pueden obtener los modelos gráfico y físico (ver FIGURA 5).

Para el modelo gráfico se le asignan texturas a los polígonos, lo que permitirá el renderizado de la escena; en el modelo físico, dichos polígonos

## Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos



**Figura 3. Modelado 3D basado en formato ASCII**



**Figura 4. Modelado 3D basado en formato OpenStreetMap**



**Figura 5. Modelado 3D gráfico/físico**

deben ser cubiertos por un volumen delimitador que permite que las físicas del lanzamiento de rayos puedan ser implementadas. El modelo físico del escenario es la base fundamental para determinar los caminos de propagación de las ondas electromagnéticas.

### MODELO DE LANZAMIENTO DE RAYOS

El lanzamiento de rayos es una técnica de trazado de rayos para el modelado de canal. En esta investigación se utilizó el principio de campo local para el trazado de rayos, el cual establece que cuando los rayos impactan en una superficie pueden experimentar interacciones –reflexión, refracción y difracción–, y a altas frecuencias, solo dependen de las propiedades eléctricas y geométricas de los dispersores.

El trazado de rayos óptico se basa en la teoría de la geometría óptica para las interacciones con el escenario: toma reflexiones para superficies planas y difracción sobre bordes rectilíneos. La geometría óptica parte de la llamada aproximación del rayo, para altas frecuencias, donde la longitud de onda de la señal es lo suficientemente pequeña comparada con las dimensiones de los objetos contenidos en el escenario, lo que permite expresar el campo electromagnético en términos de un conjunto de rayos de dimensión transversal nula y puede,

en principio, describir el campo con infinita resolución. Cada rayo es asociado a un campo eléctrico complejo y vectorial, el cual se computa dependiendo de: el campo emitido en el transmisor, las reflexiones y difracciones sufridas en el camino de propagación por el rayo, y las pérdidas de espacio libre. Las pérdidas por propagación en espacio libre se representan con la ecuación de Friss y las reflexiones aplicando los coeficientes de reflexión de Fresnel. Para las difracciones el vector de campo es multiplicado por los coeficientes de difracción pertinentes y obtenidos de la teoría de difracción uniforme (UTD, *Uniform Theory of Diffraction*).

El proceso se basa en lanzar un rayo desde el transmisor hacia la antena receptora, si el rayo impacta con un objeto, dependiendo de sus características geométricas, sufrirá: reflexión, para objetos planos; difracción, para bordes. En caso de llegar al receptor, termina el lanzamiento para dicho rayo, guardando las características asociadas a él, en el camino de propagación.

Para el modelado de canal basado en trazado del rayo óptico para escenarios exteriores, generalmente se considera que las ondas de radio se propagan a través de: reflexiones, desde paredes verticales y calles, y difracciones, desde los bordes verticales y horizontales de edificios y todas las posibles combinaciones de estas [71].

#### MODELADO DE CANAL

Las características más importantes del canal pueden ser estimadas desde parámetros de camino basados en la respuesta en frecuencia  $H(f,t)$  y la respuesta al impulso en un canal invariante en el tiempo  $h(t,\tau)$ . Los parámetros de la trayectoria para la propagación entre el transmisor y el receptor se definen por  $n=1, \dots, N(t)$  caminos de propagación [72]. Los parámetros de propagación identificados entre el transmisor y el receptor, son:

$\tau_n(t)$ : tiempo de retardo de llegada del camino;

$T_n(t)$ : matriz polarimétrica completa de transmisión del camino;

$\Omega_{(T,n)}(t)$ : dirección de salida del camino; y

$\Omega_{(R,n)}(t)$ : dirección de llegada del camino.

En cada iteración del rayo con un obstáculo, la intensidad del campo se multiplica por un factor de transferencia de propagación diádico, que representa el efecto de propagación real y un cambio en la divergencia debido

a la interacción. La conexión en cascada de todos los factores de transferencia –y por lo tanto de todos los fenómenos de propagación que ocurren– conducen a la matriz de la transmisión polarimétrica completa  $\bar{T}_n(t)$  que, junto con la longitud de camino (tiempo de retardo  $\tau_n(t)$ , caracteriza la intensidad del campo del rayo  $\Omega_{(T,n)}(t)$  y  $\Omega_{(R,n)}(t)$  se representa en colatitud y longitud (coordenadas esféricas) [73]. Usando las ganancias de las antenas transmisoras y receptoras  $G_T$  y  $G_R$  y sus patrones direccionales  $\vec{C}_T$  y  $\vec{C}_R$ , se estiman los parámetros de atenuación de la onda, de polarización, desplazamiento de la fase, retardo, ángulo de salida y ángulo de llegada, parámetros que son usados para obtener la respuesta del canal en frecuencia (1).

$$H(f,t) = \sqrt{\left(\frac{c_0}{4\pi f c}\right)^2} G_T G_R \cdot \sum_{n=1}^{N(t)} C_R(\Omega_{(R,n)}(t)) \cdot T(t) \vec{C}_T(\Omega_{(T,n)}(t)) e^{-j2\pi f \tau_n(t)}$$

$$H(f,t) = \sum_{n=1}^{N(t)} A_n(t) e^{-j2\pi f \tau_n(t)} \quad (1)$$

donde,

$c_0$  es la velocidad de la luz en el espacio libre;

$f_c$  es la frecuencia central del sistema; y

$A_n(t)$  representa la amplitud compleja de la n-ésima componente multicamino e incorpora las propiedades de las antenas transmisora y receptora [74].

La respuesta impulso que pasa bajo del canal  $h(t,\tau)$  se obtiene con la transformada inversa (2).

$$H(f,t) = \sum_{n=1}^{N(t)} A_n(t) e^{-j2\pi f \tau_n t} \quad (2)$$

donde,

$\tau_n(t)$  es el exceso de retardo de la n-ésima componente multicamino en el tiempo  $t$ ;

$2\pi f\tau_n(t)$  es el termino de la fase; y

$\delta(\cdot)$  es la función impulso unitaria que determina un camino específico que tiene componentes en el tiempo  $t$  y retardo en exceso  $\tau_n$ .

### MÍNIMOS CUADRADOS NO LINEALES (NLS )

Considerando dos sensores localizados en  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ , si el transmisor se encuentra ubicado en  $(x, y)$ , la distancia desde el emisor a los sensores está dada por (3) y (4) y la señal medida de potencia en dBm en cada sensor será (5) y (6).

$$d_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \quad (3)$$

$$d_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \quad (4)$$

$$P_1 = P_0 - 10\alpha \log_{10} \frac{d_1}{d_0} \quad (5)$$

$$P_2 = P_0 - 10\alpha \log_{10} \frac{d_2}{d_0} \quad (6)$$

La potencia de la señal recibida a la distancia de referencia en ambos casos es  $P_0$ , dado que están recibiendo una señal desde el mismo transmisor, donde  $\alpha$  es el exponente de pérdidas de camino (asumiendo que  $\alpha$  es el mismo para ambos sensores). La diferencia de potencia de estos dos sensores es entonces (7).

$$P_{12} = P_1 - P_2 = 10\alpha \log_{10} \frac{d_2}{d_1} \quad (7)$$

De (3), (4) y (7) se obtiene (8).

$$P_{12} = 5\alpha \log_{10} \frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \quad (8)$$

Entonces, si hay  $N$  sensores y  $1 \leq k \leq l \leq N$ , la expresión de (8) se puede generalizar (9).

$$P_{kl} = P_k - P_l = 5\alpha \log_{10} \frac{(x - x_l)^2 + (y - y_l)^2}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (9)$$

Si la diferencia de potencia medida en los sensores en  $S_k=(x_k,y_k)$  y  $S_l(x_l,y_l)$  es  $P_{kl}$ , el método óptimo de mínimos cuadrados no lineales permite encontrar el punto  $(x,y)$  que minimiza la suma de las diferencias de los cuadrados de las señales medidas por los sensores y la potencia de las señales recibidas teóricas, dado por la ecuación (10), para todas las combinaciones de pares de sensores. La función objetivo  $Q$  es no lineal y el único método para encontrar su mínimo es definir una malla sobre la cual se conduce una búsqueda con  $Q$  evaluada en cada punto de la malla, donde el punto de la malla que minimiza  $Q$  se selecciona como el punto estimado del transmisor [41].

$$Q(x,y) = \sum \left[ P_{kl} - 5\alpha \log_{10} \left[ \frac{(x - x_l)^2 + (y - y_l)^2}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \right] \right] \quad (10)$$

## FINGERPRINTING

En entornos donde los problemas por propagación multicamino se tornan severos, como es el caso de las áreas urbanas [75], [76], la implementación de métodos de localización basados en AOA y TDOA presenta grandes dificultades, para solucionarlas se pueden utilizar patrones de emparejamiento basados en posicionamiento, los cuales consideran características multicamino, como el *fingerprinting*, cuyo diseño envuelve un servidor de localización [77].

## ESCENARIOS PROPUESTOS

El primer escenario cuenta con pocos edificios y un área de 500x500 metros; tiene un transmisor y dos sensores, uno híbrido AOA/PDOA y otro PDOA; el segundo corresponde a un entorno urbano con una gran cantidad de edificios en un área de 500x500 metros, en él se plantea un análisis puramente PDOA;

el tercero corresponde a un entorno suburbano en el sur de la ciudad de Cali (Colombia) en un área de 3600x3600 metros y tiene un sensor AOA. Todos los escenarios presentan inclinación de suelos.

## **SIMULACIÓN DEL SISTEMA**

### **ESCENARIO I: HÍBRIDO Y SIMPLE**

Este escenario se creó con base en un archivo raster ASCII para la ciudad de Cali y, como se dijo, presenta un entorno urbano de área 512x512 metros [14]. La simulación se hizo para una frecuencia de 900MHz. Dado que la cantidad de edificios para el desarrollo del estudio es menor a la presente en el entorno urbano, la cantidad de edificios se disminuye a cinco y se mantienen los suelos inclinados. Los receptores se ubican con ausencia de línea de vista respecto del transmisor. El modelado de canal mediante lanzamiento de rayos permite obtener información del ángulo de llegada y de la potencia de recepción, datos que son utilizados por dos tipos de sensores: en uno se utiliza la información de la potencia recibida y en el otro, denominado híbrido, se utiliza la información de la potencia y el ángulo de llegada. El transmisor y los receptores se ubican a la misma altura. Primero, se define el diagrama de flujo para las simulaciones de modelado de canal orientadas a localización (ver FIGURA 6)

En la FIGURA 7 se muestra el escenario híbrido y simple simulado, en ella se puede observar la configuración de los elementos: el transmisor (TX) de color blanco, el receptor de potencia (A) de color azul y el receptor híbrido (Híbrido) de color verde, todo en un escenario de pocos edificios, NLOS y suelos inclinados.

Dado que no se tienen medidas de potencia y ángulo, en la primera simulación del escenario para el transmisor y los receptores propuestos se realiza el lanzamiento de rayos, con los parámetros de canal estimados se puede extraer la información del ángulo de llegada y la potencia de recepción, datos que se almacenan para su posterior procesamiento. Se realiza el modelado de canal, tanto para los sensores, como para los transmisores, en él es necesario formar una malla de receptores (para este escenario la malla lo cubre totalmente para receptores distanciados a 10 metros entre sí). La FIGURA 8 muestra un ejemplo de algunos rayos lanzados desde el sensor híbrido, como transmisor, hacia la malla de receptores. En la imagen, la malla está compuesta por esferas verdes, el sensor

## Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos

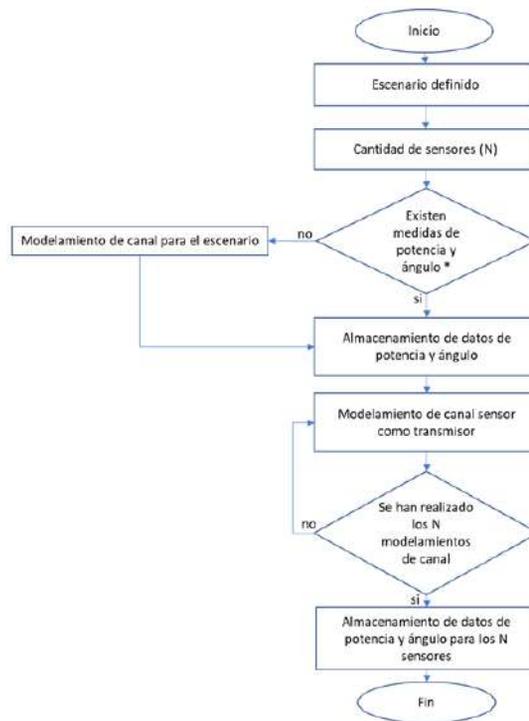


Figura 6. Diagrama de flujo para simulaciones en los escenarios

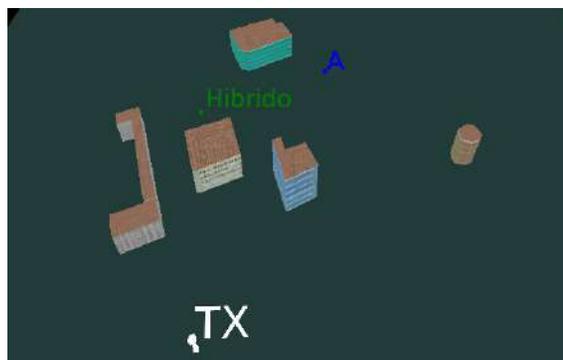
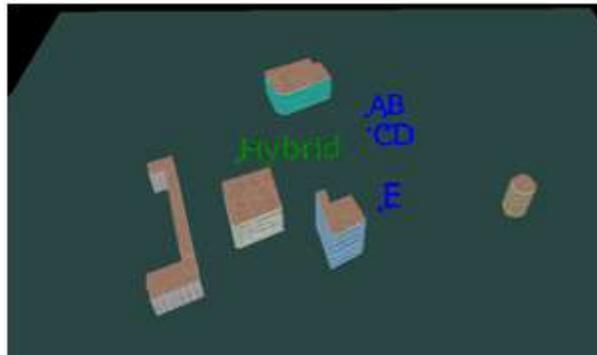


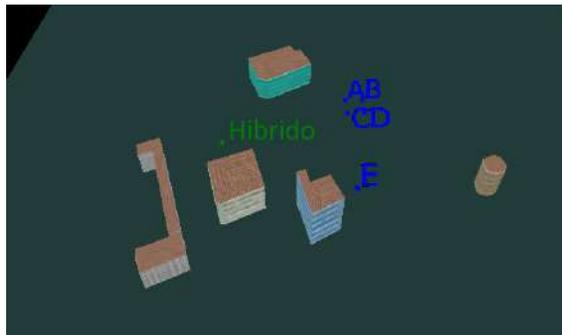
Figura 7. Escenario híbrido y simple

como transmisor de color blanco y los rayos lanzados hacia algunos receptores (las esferas negras), como líneas color violeta. Este proceso se repite para el sensor de potencia y se almacenan los datos extraídos de potencia y ángulo.



**Figura 8. Sensor híbrido como transmisor**

Como en situaciones reales, el sensor se mueve para realizar medidas, se decidió mover el sensor de potencia, conservando la NLOS con el transmisor y dejando el transmisor híbrido en su posición fija. En la FIGURA 9 se puede observar la distribución de las posiciones de los sensores de potencia e híbrido.

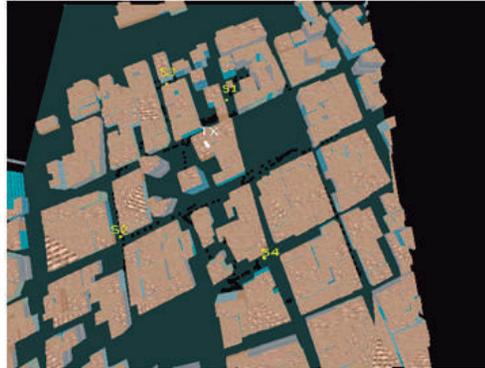


**Figura 9. Sensores híbrido y sensor de potencia móvil**

## ESCENARIO 2: PDOA

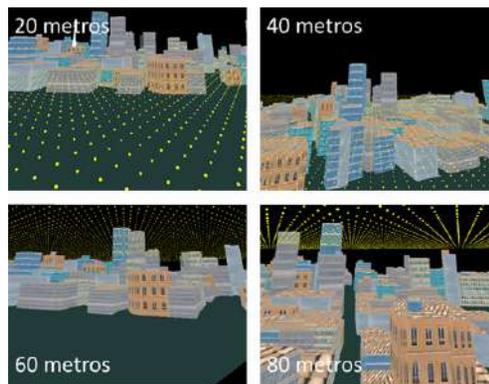
El segundo escenario se basa en un entorno real del centro de la ciudad de Cali [14] del cual se tiene información acerca de la posición real del transmisor y de las medidas potencia. Esta simulación se hace a para una frecuencia de 900MHz. De los sensores disponibles se tomaron cuatro con NLOS –la teoría de PDOA establece un mínimo de cuatro sensores para obtener una estimación 3D y de tres sensores si se diera en un entorno 2D–. En la FIGURA

10 se presentan los sensores disponibles en color negro, los elegidos en color amarillo (S1, S2, S3, S4) y la posición real del transmisor en blanco (TX).



**Figura 10. Sensores de potencia elegidos (S1, S2, S3 y S4) y transmisor escenario PDOA (TX)**

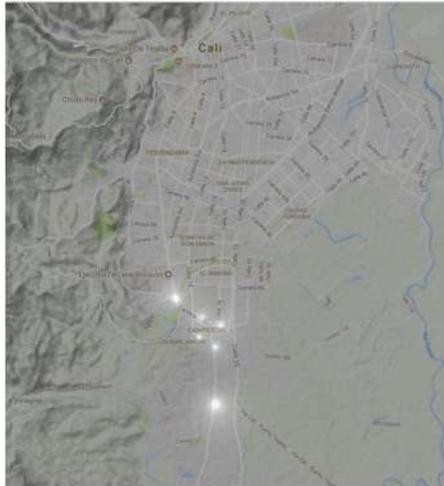
En este escenario se asumen sensores simples que solo brindan información de la potencia recibida. Mediante la diferencia de potencias se puede obtener una posición estimada del transmisor siguiendo el diagrama de flujo para las simulaciones (FIGURA 6) con una variante, como existen medidas de potencia, solo se modela el canal de los sensores como transmisores. Para mejorar la precisión, las simulaciones se dan para diferentes alturas posibles del transmisor (mallas a 20, 40, 60 y 80 metros), con una distancia de 10 metros entre elementos (FIGURA 11).



**Figura 11. Mallas de receptores para cálculo de la potencia de recepción a 20, 40, 60 y 80 metros de altura**

### ESCENARIO 3: SENSOR AOA DE APOYO AL SISTEMA DE MONITOREO

Para la simulación de este escenario se realiza una primera etapa de localización mediante NLS basada en datos tomados por un sistema de monitoreo de espectro para un transmisor no colaborativo en la ciudad de Cali. Se tomaron medidas de potencia en seis lugares del sur de la ciudad, de un transmisor en la frecuencia de 107.5 MHz. La distribución de los sensores (color blanco) se puede observar en la FIGURA 12.



**Figura 12. Medidas de potencia tomadas por el sistema de monitoreo**

Para dichas posiciones de los sensores, se realizan simulaciones de pérdidas de propagación mediante el modelo de Hata. Una vez obtenidas todas las seis simulaciones de propagación se realiza mediante la herramienta Matlab® y posteriormente este código de minimización NLS es traducido a Python, para determinar un área posible de localización. Este cálculo puede hacerse en modo desconexión o mediante consulta del Fusion Center, sistema desarrollado por el grupo i2t. El área resultante se puede observar en la FIGURA 13, sobre dicha área posible de localización se realizan las medidas de ángulo de llegada y las simulaciones de lanzamiento de rayos.

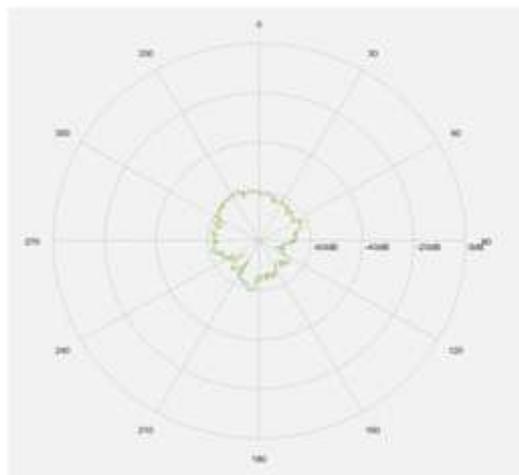
Con el fin de obtener los datos de ángulo de llegada se realiza una campaña de mediciones usando una antena directiva localizada en la terraza de un edificio de cinco pisos. Se realizaron dos medidas de 360 grados, con un grado por

## Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos



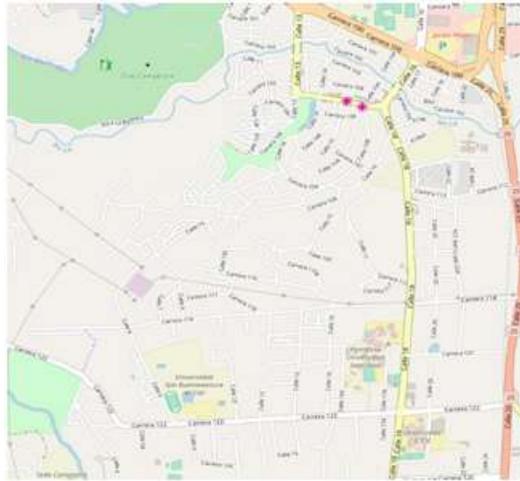
**Figura 13. Área posible resultante del proceso NLS**

paso. De las medidas obtenidas se realizó un promedio y se obtuvo la dirección de máxima potencia. El promedio de las medidas tomadas puede observarse en la FIGURA 14, donde el 0 representa el norte magnético.



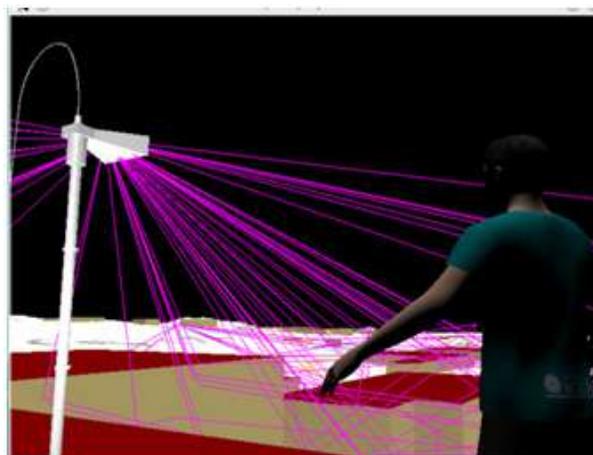
**Figura 14. Medidas promedio de campaña con antena direcciva**

El escenario planteado es de un área de 3600 x3600 metros al sur de Cali, donde la información candidata del proceso de NLS se toma como centro de búsqueda. La FIGURA 15 corresponde al mapa del área de simulación tomada.



**Figura 15. Mapa área sur de Cali tomada de OpenStreetMap**

La construcción 3D de este escenario difiere de los dos anteriores ya que se basa en información extraída de OpenStreetMap y no de un archivo raster ASCII. Una vez obtenido el modelo 3D, se realiza la simulación del área del sur de Cali. Se tiene en cuenta que la información de lanzamiento de rayos debe superponerse sobre un mapa, con el fin de evidenciar la ubicación estimada del transmisor. La FIGURA 16 presenta un ejemplo grafico de algunos rayos generados por la herramienta de lanzamiento de rayos.



**Figura 16. Sensores híbrido y de potencia móvil**

## MODELADO DE ONDA

Las ondas de radio en la simulación son modeladas como un rayo que sigue un camino recto desde el transmisor hacia el receptor. Durante ese proceso, la onda interactúa con cajas limitadoras para objetos planos, esferas limitadoras para receptores y cilindros limitadores para los bordes. Se procesan las reflexiones, las difracciones, la atenuación de espacio libre y las posibles combinaciones de estas interacciones. Para el modelado de las reflexiones de paredes, pisos y techos se aplica el coeficiente de Fresnel

La separación angular media entre rayos vecinos lanzados en un espacio 3D para el método de lanzamiento de rayos es de  $\alpha_e = 0.27^\circ$ . El algoritmo implementado en simulación está limitado a cinco interacciones, entre reflexiones, difracciones o transmisión, y a un máximo de dos difracciones en bordes verticales u horizontales. Para la estimación del impacto en volúmenes limitadores del escenario, se usan las capacidades computacionales de la tarjeta gráfica. Si un rayo impacta en un borde, los rayos resultantes del primer y segundo cono de difracción serán computados con un ángulo de incremento dado. Se considera que la resolución angular fijada en el espacio 3D para rayos generados es  $\alpha_e$  para el primer cono de difracción; asimismo, la resolución angular para el segundo cono de difracción es  $2\alpha_e$ , asumiendo que la resolución de los rayos difractados decrece de acuerdo con su orden. Con esto se logra reducir considerablemente el uso de procesador y memoria sin que ello implique una pérdida significativa de precisión, si se ha tomado una resolución angular inicial  $\alpha_e$  alta.

## VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y REVISIÓN FINAL

Se valida que todos los objetos que tienen bordes cuenten con un cilindro delimitador, algo que es crítico en el lanzamiento de rayos y gana relevancia en los modelos basados en OpenStreetMap, porque dichos objetos deben tener el orden de vértices adecuado para la simulación.

Dado que el software de lanzamiento de rayos permite saber si la totalidad de rayos inicial fue lanzada al escenario en cada una de las simulaciones, se verifica que así haya sido.

Una vez validada cada una de las simulaciones correspondientes a cada uno de los escenarios, finaliza la etapa de simulaciones y se da paso a la etapa de presentación de resultados obtenidos.

## PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### ESCENARIO I: HÍBRIDO Y SIMPLE

De la primera simulación se obtiene la información de AOA y potencia de llegada o recepción, la cual permite establecer la diferencia de potencia recibida entre el receptor híbrido y el receptor de potencia para las posiciones A, B, C, D y E. La TABLA 1 presenta la diferencia de potencia recibida para cada combinación.

**Tabla 1. Diferencia de potencia entre sensores**

Sensores	Diferencia de potencia (dB)
Híbrido A	10.89
Híbrido B	7.20
Híbrido C	1.69
Híbrido D	5.78
Híbrido E	12.68

La información del modelado de canal se almacena para cada uno de los sensores como transmisores, los datos de recepción de la malla de receptores en cada uno de estos modelados deben variar debido a que las transmisiones se dan en diferentes posiciones de los sensores actuando como transmisores. Esto ocasiona diferencia en la cantidad de archivos de salida, por lo que es necesario filtrar los archivos de salida a solamente aquellos que puedan compartir información entre sí.

Posteriormente, se analiza la información usando Matlab®. Para establecer la posible ubicación del transmisor, con la información de AOA se toma un rango de 5 grados y para las diferencias de potencias de recepción un rango de 0.05 dB. Esto es 0.025 dB más o menos del valor de PDOA en cada caso. La información AOA es evaluada por *fingerprinting* del último tramo, para la información de potencia se basa en PDOA.

El caso de análisis del sensor en la posición A y el sensor híbrido la posición estimada se presentó una diferencia de 33.06 metros respecto de la posición real del transmisor. La FIGURA 17 muestra las posiciones estimada (esfera amarilla) y real (esfera blanca). Para las diferentes posiciones del sensor de potencia, la

posición estimada tiende a acercarse a la real, como se ilustra en la FIGURA 18. En la TABLA 2 se presentan los resultados de la diferencia de distancia entre la posición real y la estimada en cada caso.

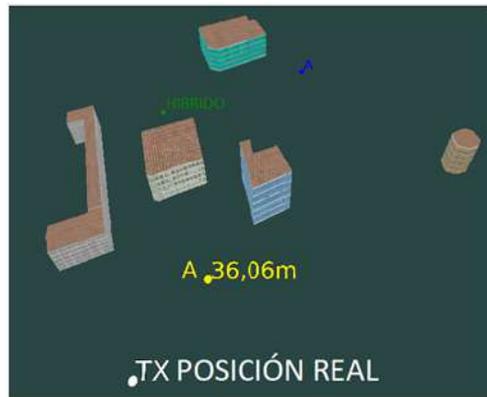


Figura 17. Estimación de posición de los sensores híbrido y de potencia en A

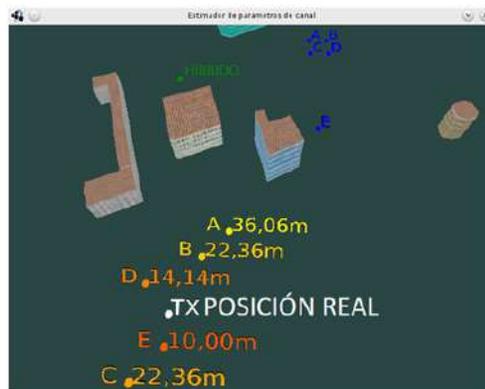


Figura 18. Distancia calculada para las posiciones estimadas

Tabla 2. Distancia entre las posiciones estimada y real

Sensores	Distancia (m)
Híbrido A	36.06
Híbrido B	22.36
Híbrido C	22.36
Híbrido D	14.14
Híbrido E	10

Dado que los elementos en la malla de receptores estaban distanciados a 10 metros entre sí, se considera un buen resultado si se tiene en consideración que la simulación se da en un ambiente NLOS y se usan solamente dos sensores para estimar la posible ubicación. Cabe notar que el mejor resultado se obtuvo para la combinación del sensor híbrido y el sensor de potencia en la posición E.

### ESCENARIO 2: PDOA

Se realizaron los análisis para estimar la posible ubicación del sensor para cada malla de receptores a diferente alturas, dichos resultados se pueden observar en la FIGURA 19, en ella las posibles posiciones a 20, 40, 60, y 80 metros tienen color naranja, amarillo, rojo y azul, respectivamente. Se evidencia que el número de posiciones candidatas para el transmisor aumenta con la altura de la malla de receptores.

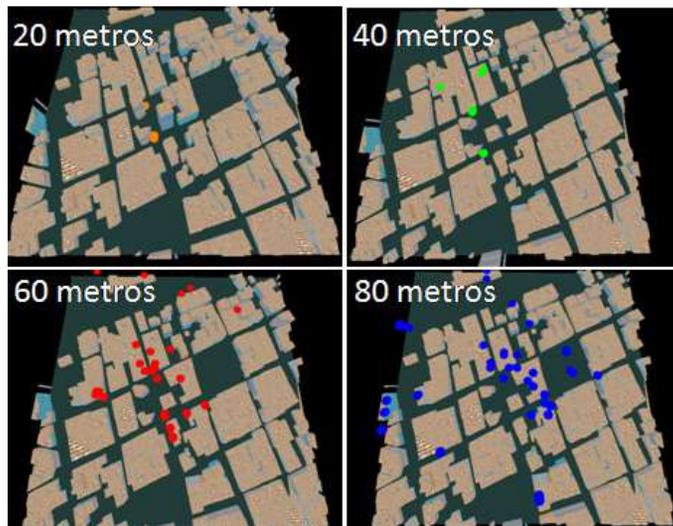


Figura 19. Posibles posiciones para diferentes alturas de mallas

Con los resultados de todas las mallas, se guarda la información de las alturas de 20 y 40 metros, pues para 60 y 80 metros se debe realizar un proceso de agrupamiento (*clustering*) mediante el método de K-means –y para la selección del k se usa el criterio de silueta–. En la FIGURA 20 se muestra a los grupos resultantes para la malla de 60 metros de altura, en ella, el grupo seleccionado

es el de la mayor cantidad de elementos, en este caso, el de puntos rojos. Finalmente, al agrupar todos los resultados de las mallas a diferentes alturas se puede realizar el cálculo del centroide de ellas, el cual muestra una distancia a la posición real del transmisor de 50.09 metros. La FIGURA 20 muestra juntos todos los candidatos resultantes de las mallas a diferentes alturas.

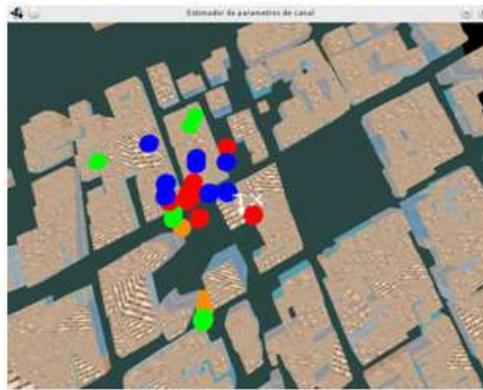


Figura 20. Posibles posiciones usando los grupos resultantes

### ESCENARIO 3: SENSOR AOA DE APOYO A SISTEMA DE MONITOREO

La información resultante del análisis NLS y de las campañas de medidas con la antena directiva limitan la simulación a la dirección de máxima potencia y a un rango de 15 grados en los sentidos horario y antihorario. De ésta simulación se obtiene la información georreferenciada, en la FIGURA 21 se muestra el resultado sobre el mapa del sur de la ciudad de Cali.

El resultado del proceso de NLS muestra un resultado de aproximadamente 1 km de distancia de la posición real del transmisor. La FIGURA 22 muestra la distancia desde el área candidata hasta la posición real del transmisor, cabe anotar que la posición real se ha tomado con base en la información del predio, mas no de la coordenada exacta del transmisor, por lo cual la estimación puede incluir algunos metros de imprecisión.

Finalmente, se superponen la información del algoritmo de NLS y la obtenida de la simulación basada en información de ángulo, al hacerlo, como se puede observar en la FIGURA 23, el área de búsqueda disminuye.

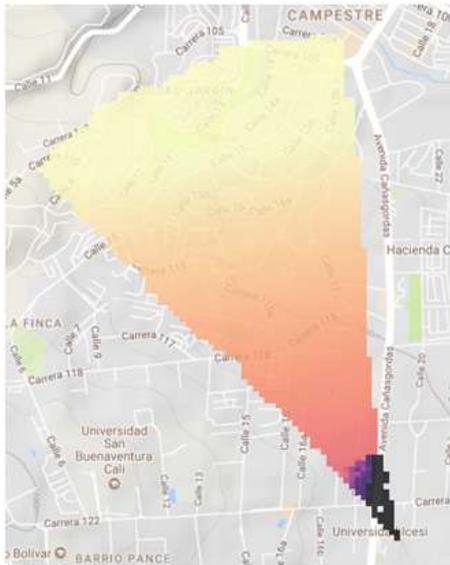


Figura 21. Resultado: área posible de ubicación del transmisor según la simulación basada en información de ángulo

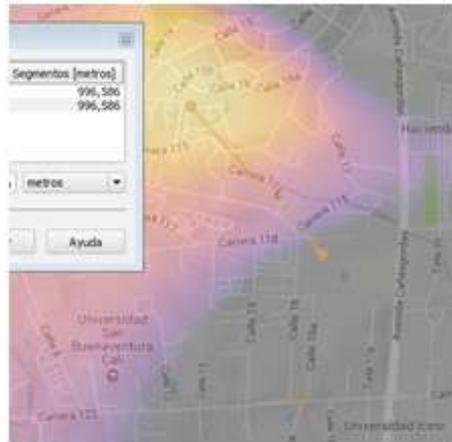


Figura 22. Resultado: distancia entre el área candidata calculada y la posición real del transmisor no colaborativo



Figura 23. Combinación de resultados NLS y AOA de áreas candidatas de posible ubicación del transmisor no colaborativo

## CONCLUSIONES

El uso de motores de juegos, tarjetas gráficas y algoritmos de lanzamiento de rayos basados en información de AOA y PDOA presentan buena precisión en la localización de emisores usando solamente dos sensores en entornos NLOS.

El uso de sensores de potencia, además de aminorar costos también permite obtener buenos resultados de localización en la mayoría de los casos.

Para un análisis de localización con una distribución geométrica irregular, los resultados presentados muestran un buen desempeño. Los tiempos de procesamiento bajos permiten la implementación para mayor cantidad de sensores y distribuciones geométricas regulares, con lo que se puede lograr una localización más cercana a la posición real.

La combinación del análisis de ángulo de llegada y NLS permiten filtrar un área de búsqueda mucho menor, y con ello disminuir el costo de este tipo de búsquedas.

Se recomienda además el uso de sensores de potencia para implementaciones que requieran poco tiempo de procesamiento y precisión limitada. En casos donde la precisión sea fundamental, se recomienda la combinación de algoritmos AOA y PDOA. Para continuar con esta línea de investigación, se sugiere el estudio de algoritmos de localización basados en TOA.

Para finalizar, cabe indicar que la información consignada en este capítulo puede ser complementada con las publicaciones de este proyecto [78]–[80].

## REFERENCIAS

- [1] R. G. Stansfield, “Statistical theory of D.F. fixing,” *J. Inst. Electr. Eng. - Part IIIA Radiocommun.*, vol. 94, no. 15, pp. 762–770, Mar. 1947.
- [2] J. H. Reed, K. J. Krizman, B. D. Woerner, and T. S. Rappaport, “An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 36, no. 4, pp. 30–37, Apr. 1998.
- [3] S. Gezici et al., “Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 70–84, Jul. 2005.
- [4] A. H. Sayed, A. Tarighat, and N. Khajehnouri, “Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 24–40, Jul. 2005.

- [5] International Telecommunications Union [ITU], *Spectrum monitoring handbook*, Ginebra, Suiza: ITU, 2011.
- [6] Ministry of Internal Affairs and Communications, *Number of unlicensed radio stations detected and dealt with* [Online]. Disponible en: [http://www.tele.soumu.go.jp/e/adm/monitoring/summary/ad\\_pro/index.htm](http://www.tele.soumu.go.jp/e/adm/monitoring/summary/ad_pro/index.htm)
- [7] Ministry of Internal Affairs and Communications, *DEURAS direction finder (DEURAS-D)* [Online]. Disponible en: [http://www.tele.soumu.go.jp/e/adm/monitoring/moni/type/deurasys/deuras\\_d.htm](http://www.tele.soumu.go.jp/e/adm/monitoring/moni/type/deurasys/deuras_d.htm).
- [8] P. Rong y M. Sichitiu, “Angle of arrival localization for wireless sensor networks,” en *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and ad hoc Communications and Networks*, IEEE, 2006, vol. 1, pp. 374-382.
- [9] S. A. Mostafa, S. H. Elramly, y M. K. Ragheb, “Adaptation of angle-of-arrival estimation in mobile communications using geometrically based channel models,” en *2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications (AusWireless, 2007)*, IEEE, 2007, p. 48.
- [10] J. Xiong y K. Jamieson, “SecureAngle: improving wireless security using angle-of-arrival information,” en *Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, New York, NY: ACM, 2010, p. 11.
- [11] H. Ling, R.-C. Chou, y S.-W. Lee, “Shooting and bouncing rays: calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 37, no. 2, pp. 194–205, Feb. 1989.
- [12] D. Tami, C. G. Rego, F. J. S. Moreira, D. Guevara, y A. Navarro, “Heuristic UTD coefficients applied for the channel characterization in an andean scenario,” en *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting ()*. IEEE, 2015, pp. 1804-1805.
- [13] A. Navarro, D. Guevara, y S. Londoño, “Using 3-D video game technology in channel Modeling,” *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1652–1659, 2014.
- [14] A. Navarro y D. Guevara, “Using game engines in ray tracing physics,” en *2010 IEEE Latin-American Conference on Communications* (pp. 1-5). IEEE, 2010, pp. 1–5.
- [15] A. Navarro, D. Guevara, N. Cardona, y J. J. Gimenez, “DVB Coverage prediction using game engine based ray-tracing techniques,” en *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [16] “How motor patrol wars with bloopers,” *Radio News Magazine*, vol. 9, no. 1, p. 37, 1927.
- [17] *Universal service and users’ rights relating to electronic communications networks and services (Universal Service Directive)*, European Parliament and the Council Directive 2002/22/EC, 2002.
- [18] *Location services (LCS)*, 3GPP TS 22.071 V5.1.1, 2002.
- [19] R. Di Taranto, S. Muppirisetty, R. Raulefs, D. Slock, T. Svensson, y H. Wymeersch, “Location-aware communications for 5G networks: How location information can

- improve scalability, latency, and robustness of 5G,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 102–112, Nov. 2014.
- [20] L. Zimmermann, A. Goetz, G. Fischer, y R. Weigel, “GSM mobile phone localization using time difference of arrival and angle of arrival estimation,” en *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, IEEE, 2012, pp. 1–7.
- [21] *Spectrum monitoring evolution*, ITU-R Report ITU-R SM.2355-0, junio, 2015.
- [22] A. Roxin, J. Gaber, M. Wack, y A. Nait-Sidi-Moh, “Survey of wireless geolocation techniques,” en *2007 IEEE Globecom Workshops*, IEEE, 2007, pp. 1–9.
- [23] J. J. Caffery, *Wireless location in CDMA cellular radio systems*. Boston, MA: Kluwer, 2000.
- [24] T. S. Rappaport, *Wireless communications: principles and practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [25] Z. Yun y M. F. Iskander, “Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089–1100, 2015.
- [26] Ng Ka-Heng, E. K. Tameh, A. Doufexi, M. Hunukumbure, y A. R. Nix, “Efficient multielement ray tracing with site-specific comparisons using measured MIMO channel data,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 1019–1032, May 2007.
- [27] A. Schmitz, T. Rick, T. Karolski, L. Kobbelt, y T. Kuhlen, “Beam tracing for multipath propagation in urban environments.” en *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, IEEE, 2009, pp. 2631–2635.
- [28] R. Fritzsche, J. Voigt, C. Jandura, y G. P. Fettweis, “Verifying ray tracing based CoMP-MIMO predictions with channel sounding measurements,” en *2010 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*, IEEE, 2010, pp. 161–168.
- [29] R. Moghrani, J. M. Conrat, X. Begaud, y B. Huyart, “Performance evaluation of a 3D ray tracing model in urban environment,” en *2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, IEEE, 2010, pp. 1–4.
- [30] Ch. Shin-Hon y J. Shyh-Kang, “An SBR/image approach for radio wave propagation in indoor environments with metallic furniture,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 1, pp. 98–106, Jan. 1997.
- [31] M. M. Moniri, D. Merkel, M. Feld, y C. Muller, “Incorporating the driver’s focus of attention into automotive applications in real traffic and in simulator setups,” en *2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE)*, IEEE, 2016, pp. 198–201.
- [32] M. Lewis y J. Jacobson, “Game engines in scientific research,” *Commun. ACM*, vol. 45, no. 1, pp. 27–31, 2002.
- [33] V. Vasudevamurt y A. Uskov, “Serious game engines: Analysis and applications,” en *2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, IEEE, 2015, pp. 440–445.
- [34] B. Kitchenham y S. Charters, “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering,” Keele University, Staffordshire: UK, TR EBSE-2007-01

- [35] S. Üreten, A. Yongacoglu, y E. Petriu, “A reduced complexity iterative grid search for RSS-based emitter localization,” en *2014 27th Biennial Symposium on Communications (QBSC)*, IEEE, 2014, pp. 149–152.
- [36] H. Lohrasbipeydeh, T. A. Gulliver, y H. Amindavar, “Blind received signal strength difference based source localization with system parameter errors,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 17, pp. 4516–4531, Sep. 2014.
- [37] S. Bohidar, S. Behera, y C. R. Tripathy, “A comparative view on received signal strength (RSS) based location estimation in WSN,” en *2015 IEEE International Conference on Engineering and Technology (ICETECH)*, IEEE, 2015, pp. 1–7.
- [38] B. Beck, R. J. Baxley, y X. Ma, “Uncooperative RSS-based emitter localization in uncalibrated mobile networks,” en *2016 IEEE 17th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [39] B. Sackenreuter, N. Hadaschik, M. Fassbinder, y C. Mutschler, “Low-complexity PDoA-based localization,” en *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [40] S. A. Engebråten, “RF Emitter geolocation using PDOA algorithms and UAVs - A strategy from emitter detection to location prediction,” Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2015.
- [41] B. R. Jackson, S. Wang, and R. Inkol, “Emitter geolocation estimation using power difference of arrival: An algorithm comparison for non-cooperative emitters,” Technical Report, Defence R&D, Ottawa, Canada, May 2011.
- [42] S. Wielandt, “Angle of arrival localization in indoor multipath environments,” en *Proc. of 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2015, pp. 13-16.
- [43] N. Aghaie y M. A. Tinati, “Localization of WSN nodes based on NLOS identification using AOA’s statistical information,” en *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, IEEE, 2016, pp. 496–501.
- [44] A. D. Redondo, T. Sanchez, C. Gomez, L. Betancur, y R. C. Hincapie, “MIMO SDR-based implementation of AoA algorithms for radio direction finding in spectrum sensing activities,” en *IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM 2015)*, IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [45] M. Grabbe, B. Hamschin, y A. Douglas, “A measurement correlation algorithm for Line-of-Bearing geo-location,” en *2013 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 2013, pp. 1–8.
- [46] J. D. Reed, C. da Silva, y R. M. Buehrer, “Multiple-source localization using line-of-bearing measurements: Approaches to the data association problem,” en *MILCOM 2008-2008 IEEE Military Communications Conference*, IEEE, 2008, pp. 1–7.
- [47] S. Wang, B. R. Jackson, y R. Inkol, “Hybrid RSS/AOA emitter location estimation based on least squares and maximum likelihood criteria,” en *2012 26th Biennial Symposium on Communications (QBSC)*, IEEE, 2012, pp. 24–29.

- [48] Y. T. Chan, F. Chan, W. Read, B. R. Jackson, y B. H. Lee, “Hybrid localization of an emitter by combining angle-of-arrival and received signal strength measurements,” en *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [49] L. Gazzah, L. Najjar, y H. Besbes, “Selective hybrid RSS/AOA approximate maximum likelihood mobile intra cell localization,” en *Proc. of European Wireless Conference 2013*, Guildford: UK, EW, 2013.
- [50] L. Gazzah, L. Najjar, y H. Besbes, “Selective hybrid RSS/AOA weighting algorithm for NLOS intra cell localization,” en *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, 2014, pp. 2546-2551.
- [51] L. Gazzah, L. Najjar, y H. Besbes, “Hybrid RSSD/AOA cooperative localization for 4G wireless networks with uncooperative emitters,” en *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, 2015, pp. 874–879.
- [52] S. Tomic, M. Marikj, M. Beko, R. Dinis, y N. Orfao, “Hybrid RSS-AoA technique for 3-D node localization in wireless sensor networks,” en *2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, IEEE, 2015, pp. 1277–1282.
- [53] S. Tomic, M. Beko, y R. Dinis, “Distributed RSS-AoA based localization with unknown transmit powers,” en *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 392–395, Aug. 2016.
- [54] N. Salman, M. W. Khan, y A. H. Kemp, “Enhanced hybrid positioning in wireless networks II: AoA-RSS,” en *2014 International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)*, IEEE, 2014, pp. 92–97.
- [55] Y. Sharma y V. Gulhane, “Hybrid mechanism for multiple user indoor localization using smart antenna,” en *2015 Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, IEEE, 2015, pp. 602-607.
- [56] V. Algeier, R. Thomä, W. Koch, y J. Thielecke, *Blind localization of mobile terminals in urban scenarios. Ilmenau, Alemania: ISLE*, 2010.
- [57] F. Aguado-Agelet, A. Formella, J. M. Hernando-Rabanos, F. Isasi-de-Vicente, y F. Perez-Fontan, “Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 6, pp. 2089–2104, Nov. 2000.
- [58] E.-de-Groot, T. Bose, C. Cooper, y M. Kruse, “Remote transmitter tracking with raytraced fingerprint database,” en *2014 IEEE Military Communications Conference*, IEEE, 2014, pp. 325-328.
- [59] E. Kupershtein, M. Wax, e I. Cohen, “Single-site emitter localization via multipath fingerprinting,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 1, pp. 10–21, Jan. 2013.
- [60] A. Haniz et al., “Propagation channel interpolation for fingerprint-based localization of illegal radios,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98.B, no. 12, pp. 2508–2519, 2015.
- [61] *JMonkey engine* [Online]. Disponible en: <http://jmonkeyengine.org/>
- [62] *jME Physics 2* [Online]. Disponible en: <https://www.openhub.net/p/1890>

- [63] R. Smith, *Open dynamics engine* [online]. Disponible en <http://www.ode.org/>
- [64] ESRI, *Esri shapefile technical description* [online]. Disponible en: <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>
- [65] Geo Tools Project, *Open source Geospatial Foundation* [Online]. Disponible en: <http://www.geotools.org/>
- [66] M. de Berg, Ed., *Computational geometry: algorithms and applications*, 3. ed. Berlin, Alemania: Springer, 2010.
- [67] Openstreetmap Foundation, *OpenStreetMap* [Online]. Disponible en: <https://www.openstreetmap.org/>, (Accedido) enero 2018.
- [68] T. Knerr, *OSM2World* [Online]. Disponible en: <http://osm2world.org/>
- [69] Blender Foundation, *Blender* [Online]. Disponible en: <https://www.blender.org/>
- [70] V. Elistratov, *Blender-osm* [Online]. Disponible en: <https://github.com/vvoovv/blender-osm>
- [71] M. Iskander y Y. Zhengqing, “Propagation prediction models for wireless communication systems,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 662–673, Mar. 2002.
- [72] T. Fugen, J. Maurer, T. Kayser, y W. Wiesbeck, “Capability of 3-D ray tracing for defining parameter sets for the specification of future mobile communications systems,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3125–3137, Nov. 2006.
- [73] T. Zwick, C. Fischer, y W. Wiesbeck, “A stochastic multipath channel model including path directions for indoor environments,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1178–1192, Aug. 2002.
- [74] L. Hsueh-Jyh, Ch. Cheng-Chung, L. Ta-Yung, y L. Han-Chang, “Applicability of ray-tracing technique for the prediction of outdoor channel characteristics,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 6, pp. 2336–2349, Nov. 2000.
- [75] H. Zamiri-Jafarian, M. Mirsalehi, I. Ahadi-Akhlaghi, y H. Keshavarz, “A neural network-based mobile positioning with hierarchical structure,” en *57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring.*, IEEE, 2003, vol. 3, pp. 2003–2007.
- [76] S. Mangold y S. Kyriazakos, “Applying pattern recognition techniques based on hidden Markov models for vehicular position location in cellular networks,” en *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference*, IEEE, 1999, vol. 2, pp. 780–784.
- [77] S. Guolin, Ch. Jie, G. Wei, y R. Liu, “Signal processing techniques in network-aided positioning: a survey of state-of-the-art positioning designs,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 22, no. 4, pp. 12–23, Jul. 2005.
- [78] W. Cruz, “Métodos AOA, PDOA e híbridos para la localización de un transmisor no colaborativo mediante lanzamiento de rayos sobre un motor de juegos,” tesis de maestría, Universidad Icesi, Cali: Colombia, 2018.

- [79] A. Navarro, W. Cruz, y Y. Castano, “Emitter location using power difference of arrival,” en *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2018, pp. 89-90, IEEE.
- [80] A. Navarro y W. Cruz, “PDOA emitter location using game engines 3D ray based tools”, en *3rd Management Committee& Scientific Meeting de la Acción COST, CA15104, Inclusive Radio Communication Networks for 5G and beyond*, IRACON, Lisboa, Portugal, COST, 2017.



# RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA EL MONITOREO DE VARIABLES CLIMÁTICAS Y DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN UN CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Oscar A. Orozco Sarasti, MSc.

Gonzalo Llano Ramírez, Ph.D

## **Citación**

O. A. Orozco y G. Llano, “Red de sensores inalámbricos para el monitoreo de variables climáticas y gases de efecto invernadero,” en *Bitácoras de la maestría: vol. 1. Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión*, Cali, Colombia: Universidad Icesi, 2019, pp. 129-170.



---

## RESUMEN

---

El cultivo de caña de azúcar y la agroindustria asociada con él tienen un peso importante en la economía colombiana, más aún el valle geográfico del río Cauca, donde se concentra buena parte de su actividad en el país. Por su relevancia, son bienvenidas las propuestas tecnológicas que permitan optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia de los procesos productivos. Este proyecto se enmarca en el concepto de agricultura de precisión y propone el diseño de una red de sensores inalámbricos destinada a medir algunas variables climatológicas (humedad e intensidad de la luz solar), junto con el pH del suelo y los niveles de tres gases de efecto invernadero, utilizando para su construcción materiales de bajo costo y tecnología de código abierto. La expectativa inicial fue que la red proveyera información útil, no solo para un mejor uso de recursos, sino también para reducir la huella de carbono de esta actividad. El prototipo se implementó y fue probado en un cultivo de caña desarrollado bajo el concepto de agricultura de conservación, junto con un proyecto paralelo que permitió la comparación de resultados. Los objetivos propuestos se cumplieron, la implementación de la red no solo hizo posible obtener los resultados esperados, sino que permitió identificar importantes aspectos para mejorar el diseño para futuras implementaciones, lo que hubiera sido imposible sin la implementación física.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations), en 2013 un tercio de la población global dependía de la agricultura para su mantenimiento y en economías emergentes este sector representaba hasta el 30% del Producto Interno Bruto (PIB) [1]. Por su importancia, gobiernos e instituciones públicas y privadas desarrollan proyectos para mejorar el sector agropecuario. Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) han empezado a ser aplicadas en el sector bajo el enfoque denominado Agricultura de Precisión (AP), con el se buscan mejores rendimientos y mayor eficiencia en el uso de los recursos. En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo considera estas acciones y focaliza su acción en la transformación de áreas rurales, persiguiendo el desarrollo sustentable a través de la modernización de los procesos, productos y servicios del campo.

La AP puede definirse como el acto de monitorear, controlar y evaluar los nutrientes adecuados y aplicarlos según las necesidades particulares del suelo, considerando la variabilidad y las condiciones específicas de cada sitio. Las tecnologías para lograr dichos propósitos son variadas e incluyen Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning Systems*), Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographic Information Systems*), monitores de rendimiento, sensores remotos y aplicadores de tasa variable [2]. La adopción de las tecnologías mencionadas en un cultivo específico depende de su ubicación, clima y tipo de suelo. Un aspecto importante en el desarrollo del agro es el control de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la cual tiende a crecer. Por ello es necesario considerar acciones dirigidas a reducir la huella de carbono asociada con esta actividad.

La caña de azúcar es un producto importante para el agro colombiano, más aún para el valle geográfico del río Cauca, lugar donde se concentra, no solo la siembra, sino la agroindustria derivada de ella. El sector no produce únicamente azúcar derivada de la caña, sino también: etanol, panela, pulpa de papel, bagazo, vinagre y energía, entre otros.

El desarrollo de la AP en el sector agropecuario colombiano se encuentra en sus primeras etapas, por ello –y por la relevancia del sector–, es necesario desarrollar de soluciones para dicha industria que ayuden a incrementar el rendimiento del cultivo y el crecimiento del PIB agrícola. Los cultivadores

de caña de azúcar utilizan principalmente métodos empíricos para aplicar fertilizantes, agua y nutrientes al cultivo, pues no cuentan con las herramientas para informarse acerca del estado “actual” de determinados elementos que potencialmente podrían incrementar su rendimiento y reducir el impacto de la actividad en el medio ambiente.

Por la relevancia del cultivo de caña de azúcar en la economía de Colombia y la necesidad de controlar su impacto negativo en el ambiente, se requieren soluciones que faciliten el monitoreo de las principales variables agronómicas (pH y humedad del suelo) y climáticas (temperatura, humedad e intensidad de luz) y sus potenciales emisiones de los principales GEI: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), para incrementar la eficiencia en los procesos de producción y reducir su impacto negativo en el ambiente.

La propuesta de este proyecto de investigación fue la implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Network*) que monitoreen dichas variables en cultivos de caña de azúcar localizados en el valle geográfico del río Cauca. La WSN propuesta tiene como base la plataforma Arduino y emplea un juego de sensores junto con módulos XBee® y de Radiofrecuencia (RF) para la transmisión de la información. Los dispositivos son energizados por baterías de polímeros de litio (LiPo, *Lithium Polymer*) soportadas por paneles solares. El objetivo de esta WSN es proveer información del estado del cultivo y de los niveles de algunas variables que ayuden a cuantificar y potencialmente reducir la huella de carbono de los procesos de cultivo asociados.

La primera implementación del prototipo de WSN se llevó a cabo en un cultivo de caña orgánica con características de Agricultura de Conservación (AC): mínima labranza mecánica del suelo, uso de fertilizantes orgánicos y uso de hojas de caña de azúcar como abono natural. Las mediciones fueron llevadas a cabo utilizando la técnica de cámara cerrada y se tomaron de manera paralela al desarrollo del proyecto de Lubo, Rodríguez, Abadía, Orozco, Sierra, Llano y López [3], con el fin de comparar los resultados.

La falta de monitoreo de las variables agronómicas y climáticas en un cultivo, además de imposibilitar el control de la potencial huella de carbono de los procesos asociados al mantenimiento del cultivo, puede afectar la cantidad requerida de insumos agrícolas, y alterar así las ganancias de los agricultores.

Considerando la importancia que tiene la caña de azúcar en el PIB de Colombia, las soluciones para mejorar sus procesos de producción son relevantes

para las partes involucradas en el manejo del cultivo. Lo anterior permitirá asistir a los cultivadores en las labores acarreadas e incrementar el rendimiento del cultivo al optimizar los insumos agrícolas necesarios, reduciendo de paso las emisiones potenciales de GEI y mejorando su competitividad.

La AP en Colombia, por estar en sus primeras etapas de implementación, aún genera cierta incertidumbre acerca de sus beneficios. En el entorno colombiano, la AP debe romper algunos paradigmas, entre ellos:

- la inversión inicial para tecnologías de AP es elevada y su retorno requiere de un tiempo considerable;
- el uso de las nuevas herramientas es complejo y requiere de agricultores más educados y con algunas habilidades especiales desarrolladas;
- la implementación de prácticas de AP en economías emergentes reemplaza la mano de obra y genera, por ello, conflictos sociales; y
- la estandarización de elementos utilizados en AP no es tan clara como en otras áreas del conocimiento, lo que aumenta los tiempos de implementación.

La propuesta descrita en este documento intenta afrontar estos puntos utilizando tecnologías de bajo costo, que requieren un conocimiento básico de ciertos tópicos tecnológicos, que no reemplazarán al agricultor, sino que complementarán sus labores. Si bien el proyecto no aporta soluciones al problema de la falta de estandarización, para favorecer su réplica, usa elementos *open source*, lo que facilita el acceso universal a sus archivos, documentos y esquemáticos.

Para la investigación se definió como objetivo general: “Diseñar e implementar una red de sensores inalámbricos capaz de medir automáticamente las variables agronómicas y climáticas más relevantes y los gases de efecto invernadero en un cultivo de caña de azúcar”, para alcanzarlo se establecieron como objetivos específicos: definir los requerimientos funcionales y no funcionales de la red de sensores inalámbricos para el monitoreo del cultivo; diseñar la topología de red (física y lógica) de la red; determinar y categorizar los niveles de las variables agronómicas y climáticas medidas junto con los gases de efecto invernadero en el área estudiada; y evaluar el desempeño del sistema respecto de los requerimientos definidos.

## MARCO TEÓRICO

### LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

El concepto es relativamente nuevo si se tiene en cuenta que la agricultura ha acompañado al hombre desde hace miles de años, desde cuando dejó de ser nómada-recolector y se transformó en sedentario-productor. Aun cuando los avances tecnológicos relacionados con agricultura han sido constantes –desde 1920 los granjeros y agricultores han buscado maneras para incrementar su producción–, el término AP fue acuñado en la década de 1960 con la aparición de los GIS [7], de hecho los primeros experimentos que consideraron la variabilidad del suelo en función del rendimiento del cultivo datan de 1967 [8].

AP tiene diversas denominaciones para las comunidades científica, académica y comercial. Algunos sinónimos de AP son agricultura específica por sitio, labranza de precisión y tecnología de tasa variable. Agricultura de precisión es el término más utilizado, consiste en una serie de elementos tecnológicos utilizados para medir y controlar las características específicas del suelo buscando incrementar el rendimiento de los cultivos, su objetivo principal, por ende, es integrar la gestión espacial y temporal del manejo usando sistemas geográficos (GPS y SIG), redes de sensores y mapas de terreno [9].

El concepto ha evolucionado de manera paralela a las tecnologías que lo soportan. Desde los años 60 hasta el fin de los 80, el crecimiento en los sistemas de GPS y SIG permitió a los agricultores empezar a controlar las rutas utilizadas por su maquinaria agrícola. Con el inicio de la era digital y la masificación de la Internet, se inició la digitalización de la información y emergieron nuevas soluciones para incrementar el rendimiento de los cultivos.

Las WSN, los Sistemas de Soporte a Decisiones (DSS, *Decision Support Systems*) y los sistemas de mapeo son algunas de las tecnologías que la AP utiliza [10]. En los últimos años se ha incorporado Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) –llamados comúnmente “drones”–, como herramientas de monitoreo y control de los cultivos desde el aire, dado que permiten obtener una vista más amplia y así detectar plagas y enfermedades, verificar la salud de las plantas y proveer fotogrametría y teledetección, entre otros usos [11].

La AP puede asumirse como un ciclo repetitivo que se ejecuta durante la vida del cultivo, donde la información de las cosechas se monitorea y almacena

constantemente en computadores, lo que permite la generación de mapas de rendimiento y análisis de suelos que sirven de base para generar estrategias que reduzcan los problemas potenciales relacionados con la producción del cultivo [12]. En la FIGURA 1 se resume este ciclo y se presentan algunas tecnologías que pueden emplearse en él. Aun cuando el ciclo que se presenta en dicha figura es general, es importante mencionar que por cada caso, los procedimientos, técnicas y tecnologías son adaptadas a diversas variables como la geografía del sitio, clima, tipo de suelo y cultivo.

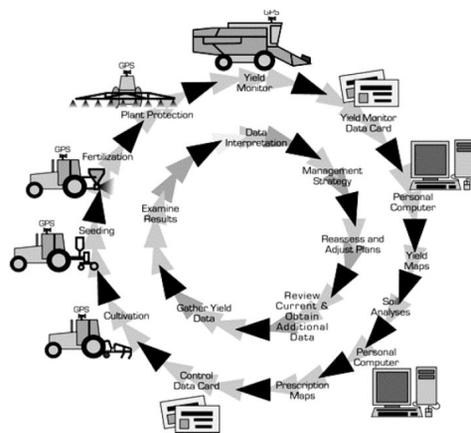


Figura 1. Ciclo general de la agricultura de precisión [13]

## REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Las WSN son una de las tecnologías empleadas en la AP, se trata de una nueva clase de sistemas distribuidos que conforman una parte integral del espacio físico que habitan. Consisten en una colección de nodos organizados en una red cooperativa que tiene un propósito general y distribuida geográfica y topológicamente en diversos lugares [14]. El pequeño tamaño de los sensores permite su ubicación en lugares remotos, su principal objetivo es recolectar, almacenar y transmitir información a los nodos maestros. Además de los sensores, las WSN cuentan con una Unidad Central de Procesamiento (CPU, *Central Processing Unit*) y un transceptor. Los sensores capturan las variables deseadas para su medición, la CPU procesa la información y la envía hacia el transceptor, y este provee conectividad inalámbrica para comunicar el fenómeno de interés observado [15], como se muestra en la FIGURA 2.

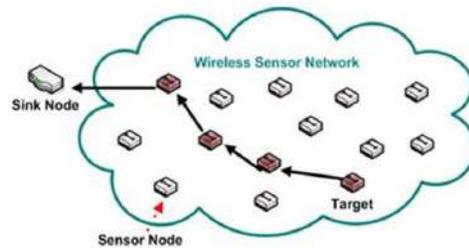


Figura 2. Diagrama general de una red de sensores inalámbricos [16]

Aunque las WSN utilizan diversas tecnologías, en general comparten la misma pila de protocolos, tanto los nodos maestros, como los nodos sensores. Dicha pila incluye cinco capas que se utilizan para propósitos de comunicación: aplicación, transporte, red, enlace de datos y física; y tres planos transversales a todas las capas que se utilizan para propósitos de gestión: de tareas, de movilidad y de energía [15]. En la FIGURA 3 se presenta la pila general de protocolos.

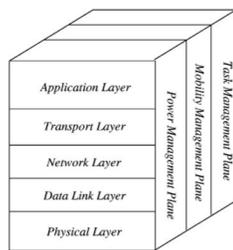


Figura 3. Pila general de protocolos para redes de sensores [15]

Es posible inferir que esta pila general es similar a la pila de protocolos TCP/IP, la diferencia es la adición de los planos verticales que operan para todas las capas. En la capa de aplicación se pueden construir varios programas de software dependiendo de que se quiera medir, desde un simple elemento mostrando la información recibida de los sensores hasta mapas complejos, imágenes y gráficas; la capa de transporte ayuda a mantener el flujo de datos si la aplicación del sensor lo requiere y el protocolo MAC de la capa de enlace de datos se encarga de manejar y minimizar las colisiones cuando otros nodos envían mensajes de *broadcast*; la capa física define las técnicas de transmisión y recepción, y el medio de transmisión a utilizar.

La diferencia con la pila de protocolos TCP/IP está en los planos verticales de gestión que se utilizan para monitorear la energía, el movimiento y la distribución de tareas entre los nodos sensores. La energía es un tema crítico en las WSN puesto que ellas no están conectadas permanentemente a fuentes fijas de energía (como otras redes) y, por lo general, la ubicación de sus nodos es remota. Por otra parte, distintas tecnologías pueden ser las más adecuadas para las necesidades de las investigaciones, dependiendo de los datos a medir, la ubicación, la distancia, los costos y las bandas de frecuencia.

Las tecnologías empleadas en WSN conllevan un amplio conjunto de entidades de estandarización, las más relevantes son [17]-[20]:

- IEEE 802.15.4: consiste en un sistema de comunicación de corto alcance que permite proveer aplicaciones con bajo *throughput* y flexibilidad en los requerimientos de latencia. Se enfoca en el desarrollo a bajo costo, con baja complejidad y bajo consumo de energía, además de focalizar el desarrollo de aplicaciones utilizando comunicaciones de corto alcance, maximizando la vida útil de las baterías. El estándar define tres bandas de frecuencia (868, 915 y 2.400 MHz) y 27 canales semidúplex.
- ZigBee: define los protocolos de comunicación construidos sobre el estándar IEEE 802.15.4 para topologías de red en estrella, árbol o *peer to peer*; y provee un *framework* para la programación de aplicaciones en la capa de aplicación de la FIGURA 3. Define los roles para los nodos dependiendo de sus funciones: coordinador, enrutador o final (*end-device*), los primeros son los maestros, los segundos actúan como puentes de información y los últimos son esclavos (nodos sensores).
- 6LoWPAN: protocolo definido para utilizar IPv6 sobre Redes de Área Personal (PAN, *Personal Area Networks*) de baja potencia y baja tasa de transferencia de datos basadas en IEEE 802.15.4. Provee una capa de adaptación puesto que el tamaño de los paquetes IPv6 es mayor que el que generalmente se maneja por el estándar 802.15.4, por consiguiente, se define un nuevo formato de paquete y una nueva gestión de direcciones. La principal diferencia con ZigBee es que los dispositivos 6LoWPAN son capaces de comunicarse con otros dispositivos basados en IP, mientras que ZigBee necesita un gateway IP para interactuar con ellos.
- WirelessHART: provee un protocolo de comunicaciones inalámbricas para la medición de procesos y el control de aplicaciones basado en el estándar

802.15.4 para dispositivos de baja potencia a 2.4 GHz. Se enfoca en la confiabilidad y seguridad de las comunicaciones al utilizar encriptación, verificación, autenticación y mensajes sincronizados en el tiempo.

- ISA100.11a: estándar diseñado para dispositivos de monitoreo de baja tasa de datos y para aplicaciones de automatización; define las especificaciones del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*) relacionados con la seguridad y gestión del sistema. Se enfoca en el bajo consumo de energía, la escalabilidad y robustez en la infraestructura y la interoperabilidad con otras tecnologías en la banda de 2.4 GHz.
- Bluetooth y BLE: por su robustez, baja potencia y bajo costo es posible utilizar Bluetooth en las WSN. Opera en la banda de 2.4 GHz con un alcance de hasta 10 metros, su versión mejorada –Bluetooth de Baja Energía (BLE, *Bluetooth Low Energy*)– se enfoca en consumos ultra bajos de energía al transmitir pocas cantidades de información con latencias bajas hacia los otros nodos de la red en función de: los modos de conexión y de descubrimiento, el número de paquetes transmitidos en las conexiones y el tamaño de cada paquete.
- ANT: tecnología propietaria (pero de acceso abierto) que utiliza una pila de protocolos de comunicación para aplicaciones de ultra bajo consumo de energía, se enfoca en la coexistencia, la representación de datos y la señalización y detección de errores. Conceptualmente es similar a BLE y opera en la banda de 2.4GHz, pero se orienta exclusivamente hacia el uso en sensores.

Las tecnologías descritas son algunas de las más citadas en la literatura científica; existen diversos enfoques propietarios y comerciales pero están basados en las tecnologías descritas para las capas inferiores y personalizan la capa de aplicación en la FIGURA 3. Se puede inferir que la tecnología base para redes WSN es el estándar IEEE 802.15.4, puesto que es utilizado en las capas física y de enlace de datos de otras tecnologías.

Se puede afirmar que la banda de frecuencias más común para aplicaciones de redes de sensores es la de 2.4 GHz, se trata de una banda no comercial que cumple con las características básicas de atenuación, longitud de onda y complejidad del hardware para muchas aplicaciones WSN. Sin embargo, existen otras bandas aplicables a estas redes de sensores clasificadas en la Banda

Industrial, Científica y Médica (ISM, *Industrial, Scientific and Medical*), ellas presentan –dependiendo del ambiente– una relativamente baja atenuación y bajos niveles de pérdidas.

## ESTADO DEL ARTE

Con el fin de establecer un punto de partida alrededor del conocimiento generado en el campo de las WSN aplicadas a cultivos de caña de azúcar para el monitoreo de variables agronómicas y climáticas, se empleó la propuesta de Kitchenham y Charters para la construcción de revisiones sistemáticas de literatura [25]. Aún cuando se enfoca en revisiones de ingeniería de software, dicha propuesta es aplicable a otras áreas del conocimiento. La clasificación de las tecnologías de AP empleadas en los trabajos revisados [26] mostró: sistemas de soporte a decisiones, teledetección y arquitecturas de red y sistemas GPS, cinco casos de cada una; sistemas de información integrales, cuatro casos; y sistemas de recomendación aplicados a la cosecha y tecnologías de tasa variable, tres casos cada una. Proyectos Relacionados con DSS

## CASOS DE ESTUDIO EN CAÑA DE AZÚCAR Y CAFÉ

Cock et al., [27] presentan una metodología para determinar algunas prácticas para el manejo de cultivos a través de prácticas de AP con base en labores tradicionales, en su trabajo definen los datos de gestión y análisis del cultivo utilizando bases de datos centralizadas y proponen mejores prácticas para asegurar la accesibilidad de dicha información por parte del personal responsable de los cultivos. Demattê, Demattê, Alves, Negrão y Morelli [28], por su parte comparan procesos de muestreo y producción, daño y costos en cultivos de caña de azúcar (con AP vs tradicional), en casos de estudio realizados en Brasil y presentan recomendaciones y sistemas de soporte a la toma de decisiones con base en los requerimientos puntuales del sitio estudiado. Asimismo, Palma et al., [29] presentan los resultados de rendimiento de un sistema de recomendaciones de cinco fases para el uso de fertilizantes en la caña de azúcar e indican los nutrientes requeridos en cada dosis de fertilizante aplicada.

La propuesta presentada en este documento puede verse como un DSS, pues su principal objetivo es informar los valores de las variables evaluadas para soportar diversas decisiones que, en el largo plazo, impactarían en el rendimiento

del cultivo y en las emisiones de GEI. Consecuentemente, la propuesta descrita difiere de las presentadas porque se basa en una WSN personalizada para el estudio y análisis de un cultivo orgánico de caña de azúcar.

## TELEDETECCIÓN Y ARQUITECTURAS DE RED

Urbano [30] presenta el diseño preliminar de una WSN basada en el estándar IEEE 802.15.4 con la que se obtuvo información de temperatura, humedad, radiación solar y flujo fotosintético en cultivos de café. El prototipo utiliza una topología en estrella con un nodo coordinador y tres nodos sensores comunicados inalámbricamente con módulos XBee. El autor hace énfasis en que el consumo de energía de este tipo de sensores debería ser el mínimo posible para incrementar el tiempo de vida de estas redes. Sudduth, Drummond, y Kitchen, por su parte [31], presentan los resultados de una investigación acerca del uso de sensores de inducción electromagnética para obtener la conductividad eléctrica del suelo. En su trabajo, las posibles medidas de error derivadas del uso de los sensores son: la salinidad del suelo, la humedad, la profundidad y la presencia de arcilla; presentan además algunas técnicas de calibración para los sensores utilizados cuando se emplean en diversos cultivos.

Otros trabajos de WSN que utilizan el concepto de AP son: el de Kalaivani, Allirani y Priya [32], que consiste en una encuesta acerca de WSN basada en la especificación ZigBee en el sector agrícola; el de Hwang, Shin y Yoe [33], que presenta un sistema de monitoreo ambiental para supervisar la información concerniente a procesos de producción agrícola utilizando redes de sensores; y el de Burrell, Brooke y Beckwith [34], quienes presentan el diseño de una plataforma que introduce la vinicultura de precisión en Douro (Portugal) utilizando un subsistema de gestión de energía capaz de recargar baterías con la energía recolectada del ambiente.

Estas últimas investigaciones están más relacionadas con el objetivo de nuestro proyecto, pues presentan WSN para un propósito específico, aunque a diferencia de ellas, el proyecto actual se relaciona con la construcción de los sensores utilizando hardware de código abierto enfocado en la caña de azúcar, sus variables agronómicas y climáticas y los GEI más relevantes.

Otros trabajos enfocados específicamente en la caña de azúcar y en redes de sensores son los de: Hu, Le, Corke y Jha [35], quienes presentan una WSN para recolectar datos en tiempo real de la calidad del agua para investigar

cómo las actuales prácticas de riego afectan el medio ambiente; Guedes et al., [36] quienes presentan un sistema de adquisición de datos distribuido para informar acerca del control de la plaga *Puccinia kuehniïy* en la industria azucarera Brasileña; y Diago y Carbonel [37], quienes presentan una red de monitoreo del suelo utilizando un sistema de comunicación inalámbrica en un cultivo de caña de azúcar en el valle geográfico del río Cauca. Este último trabajo comparte algunas características con el proyecto que se presenta en este documento, como el uso de módulos XBee, el enfoque en la caña de azúcar y la topología empleada, pero difiere de él, que no utiliza recolectores de datos (*dataloggers*) comerciales y se enfoca en el diseño de una red para medir GEI y variables agronómicas y climáticas. En la TABLA 1 se compara la propuesta del proyecto (columna PY) con las de mayor similitud, lo que permite notar cómo el proyecto soporta la mayoría de las características descritas y es, por lo tanto, una solución adecuada para alcanzar los objetivos propuestos.

**Tabla 1. Propuestas encontradas vs propuesta del proyecto (PY)**

Característica	[30]	[31]	[33]	[34]	[35]	[36]	[37]	PY
Hardware de código abierto	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si
Monitoreo de diversas variables	Si	Si	Si	Si	Si	Si	¿?	Si
Transmisión inalámbrica a baja potencia	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Energizado por fuentes renovables	No	No	Si	Si	No	Si	No	Si
Medición de GEI	No	Si						
Enfocado en caña de azúcar	No	No	No	No	Si	Si	Si	Si
Aplicable a otros cultivos	¿?	¿?	¿?	Si	Si	No	¿?	¿?
Sensores personalizables	Si	Si	No	No	No	No	Si	Si
Información desplegada en el nodo maestro remoto	Si	Si	Si	Si	Si	Si	¿?	Si
Aplica para un DSS	Si	No	Si	No	Si	Si	Si	Si
Características de escalabilidad	¿?	No	Si	¿?	¿?	Si	Si	Si
Elementos ligeros y portables	Si	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si

## EL PROYECTO

### METODOLOGÍA

La metodología empleada para este proyecto es una combinación de pasos de otras metodologías, organizadas de tal manera que la retroalimentación entre

ellas sea posible: la característica de terminar tareas de manera secuencial se heredó del modelo de cascada descrito por Balaji y Murugaiyan [4]; el proceso de diseño de hardware fue adaptado y personalizado del trabajo de Zeidmann [5]; y la descripción de escenarios, toma como base los pasos descritos por Ulgen, Black, Johnsonbaugh y Klunge [6]. Este enfoque le aportó flexibilidad a la metodología, sin perder de vista el propósito central, que los pasos permitan cumplir con los objetivos propuestos. La FIGURA 4 presenta la metodología empleada en el proyecto, cuyos pasos se describen a continuación.



**Figura 4. Metodología**

- Descripción de necesidades. Descripción general de las necesidades del cultivador de caña de azúcar en relación con las variables a medir. Dichas necesidades están principalmente asociadas con la necesidad de monitorear el cultivo de manera automática y el requerimiento de informar acerca de las variables agronómicas y climáticas.
- Escribir especificaciones. Con base en la documentación de las necesidades se presenta la solución potencial para ellas de manera general, esto se relaciona con: la elección de hardware y la selección entre las diversas opciones considerando aspectos como el precio, el tipo de licencia, la disponibilidad, el soporte, los trabajos previos y la adaptabilidad a los requerimientos.
- Selección de tecnologías y herramientas. Elección de todos los elementos que conformarán la WSN, con base en las especificaciones. Aunque algunos elementos pudieron haber sido previamente seleccionados, esta etapa es importante para detallar todos los componentes y verificar su compatibilidad.

- Definición del sistema. Descripción de la manera en que los sensores interactúan entre sí, la topología de la red, la ubicación física de los nodos y los escenarios de prueba a evaluar. Es importante probar diversos comportamientos de la WSN antes de la implementación en el cultivo para asegurar un rango adecuado de cobertura inalámbrica y potencia y verificar su desempeño antes de la implementación. Los resultados satisfactorios de estas pruebas permiten continuar con el siguiente paso.
- Diseño del sistema. Presenta principalmente la construcción de los sensores para su implementación en el cultivo, considerando los factores que pueden impactar dicho montaje: clima, encapsulado de sensores, ubicación, tópicos de seguridad para los nodos, etc. El producto se debe probar primero en un ambiente controlado.
- Implementación física. Colocación de los sensores y demás elementos en el cultivo, para iniciar las pruebas en campo.
- Verificación formal. Verificación formal del funcionamiento de la WSN en el cultivo. Se deben ejecutar pruebas de: cobertura, calibración de sensores y operación esperada.
- Revisión final. Evaluación del desempeño del sistema, esto es si el comportamiento de la WSN es el esperado, si opera como se espera y si los resultados son relevantes para el cultivador.

## UBICACIÓN

La caña de azúcar pertenece a la familia *Poaceae* y tiene parentesco con el arroz, maíz, trigo y sorgo; sus variedades son clones propagados por corte del tallo [21]. Aunque su principal producto es el azúcar, de ella también se obtiene: vinagre, alcohol, panela, pulpa de papel, vinaza, bagazo y bioetanol [22].

En Colombia, la producción de caña está focalizada en el valle geográfico del río Cauca, ubicado al suroccidente del país, conformado por el departamento del Valle del Cauca, el norte del departamento del Cauca y el sur de los departamentos de Risaralda y Caldas. Abarca 47 municipalidades con una área total de más de 208,000 hectáreas. La temperatura promedio de la zona es de 25° centígrados y tiene precipitaciones anuales promedio de 1,000 mm/año [23]-[24]. Estas condiciones climáticas y su ubicación geográfica, permiten que Colombia sea uno de los pocos países donde se cultiva y siembra caña de azúcar durante todo el año.

El lote de caña de azúcar elegido para la implementación de la WSN está ubicada en Bugalagrande (Valle del Cauca) en una granja que conserva labores tradicionales relacionadas con el cultivo de la caña y utiliza elementos de la Agricultura de Conservación (AC), tales como el uso de fertilizantes orgánicos (estiércol de gallina y oveja), el control de maleza con corderos, el mínimo uso de maquinaria para labranza (una vez durante el ciclo de vida del cultivo), la escarificación controlada, la siembra intercalada con frijón caupí (*Vigna Unguiculata*) como fijador natural de nitrógeno y el no uso de quema de la caña como estrategia de cosecha (una práctica muy arraigada en el sector). Casi la totalidad de la caña de azúcar plantada se utiliza para la producción de panela, lo no usado se vende a otros ingenios como caña orgánica. En el diagrama de flujo de la FIGURA 5 se representa el proceso de cultivo que realizan los agricultores en la granja, en él es posible observar las prácticas de AC descritas y los dos únicos procesos mecánicos realizados al suelo (escarificación y arado).

El área de estudio corresponde a una hectárea sembrada de caña de azúcar orgánica, en la cual los sensores se ubicaron junto con las cámaras del proyecto de Lubo et al. [3]. La distancia entre la ubicación de los sensores y la granja

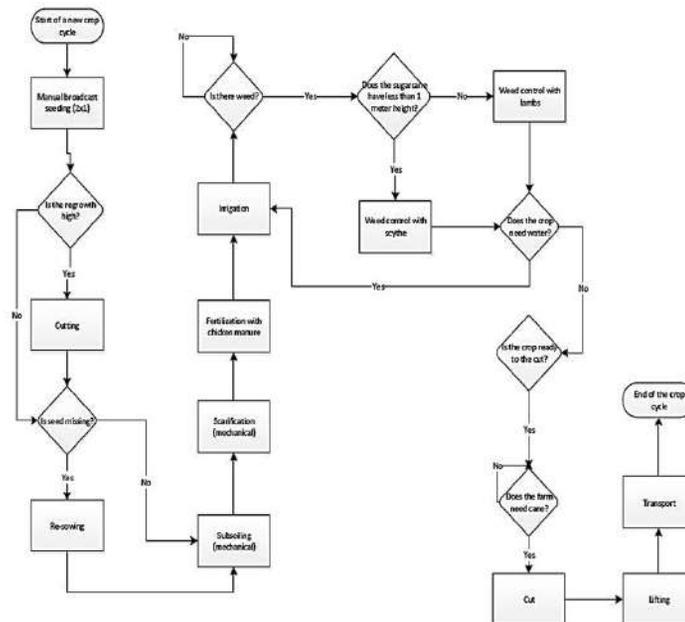


Figura 5. Diagrama de flujo de los procesos ejecutados en la granja

es de 2.26 km en línea de vista, por lo tanto se requirió de un repetidor en la mitad de esta línea imaginaria (ver detalles de la implementación en la sección siguiente).

## REQUERIMIENTOS FUNCIONALES Y NO FUNCIONALES

Como indica la teoría [38], los requerimientos funcionales describen lo que debería hacer un sistema, mientras que los requerimientos no funcionales elevan restricciones sobre él, sumados permiten la correcta y adecuada caracterización de la red propuesta. Los principales requerimientos, junto con los medios para materializarlos se presentan en la TABLA 2.

**Tabla 2. Requerimientos del producto esperado**

Tipo	Requerimiento	Comentario
Funcional	La WSN debe capturar los datos deseados a través de los sensores y enviarlos al computador central en el sitio remoto, asegurando la confiabilidad de los datos transmitidos.	
	La comunicación entre los nodos debe ser con latencia baja y libre de colisiones para garantizar los niveles adecuados de señal.	Esto se cumple al utilizar los nodos XBee en modo API y el transceptor RF en su método más eficiente de transmisión.
	Los nodos sensores deben operar incluso si no hay luz solar, asegurando una correcta transmisión de datos.	Esto se solucionó utilizando paneles solares que recargan las baterías y proveen energía cuando “no hay” sol.
	Los GEI deben medirse especialmente cuando la maquinaria agrícola realice labores sobre el cultivo.	Las prácticas de mantenimiento del cultivo se completaron en las pruebas de campo, por tanto, esto solo es una recomendación para casos de uso más intensivo de maquinaria.
	La información capturada por los sensores debe ser relevante para los empleados en la granja y servir de soporte para la toma de decisiones relacionada con actividades específicas en el cultivo.	La evaluación del desempeño de la WSN es la actividad más relevante asociada con este requerimiento.
No funcional	Los sensores deben estar bien calibrados, correctamente ubicados y operando normalmente para una correcta medición de las variables deseadas.	Esto se confirma evaluando todas las variables que podrían afectar el proceso.
	El canal inalámbrico utilizado por los transceptores debe presentar condiciones favorables acerca de la interferencia, pues en las áreas rurales no existen muchos elementos que operen en la frecuencia elegida.	Este es un comportamiento esperado, la interferencia debería ser poca o nula en la banda de frecuencias elegida (2.4 GHz y 433 MHz).

**Tabla 2. Requerimientos del producto esperado (continuación)**

Tipo	Requerimiento	Comentario
No Funcional	<p>La encapsulación de los elementos debe ser adecuada y considerar las propiedades del suelo, para así evitar fugas o filtraciones en los elementos utilizados.</p> <p>Para una adecuada caracterización de la huella de carbono, los resultados obtenidos por la WSN deberían estar en el mismo orden de magnitud (evitar altos valores de sesgo).</p> <p>La presentación de la información al personal en la granja debe ser tan amigable, específica y puntual (disponible si se requiere), como sea posible.</p>	Los recipientes empleados son plásticos, por lo que se espera que sean duraderos y no corrosivos al contacto con el suelo.

## ALCANCE Y ARQUITECTURA

El alcance del proyecto fue definido como "implementar una WSN capaz de monitorear diversas variables en un cultivo de caña de azúcar orgánica" y se planteó realizar esta implementación para medir la concentración de los GEI más relevantes y comparar las mediciones con datos obtenidos utilizando la técnica de cámara cerrada, utilizando la cámara que se muestra en la FIGURA 6.



**Figura 6. Cámara empleada en el proyecto (diámetro = 25.4 cm; altura = 15 cm)**

Este proyecto se llevó a cabo en paralelo con otro donde se obtuvieron las concentraciones de gases de manera manual y se enviaron a un laboratorio especializado para su análisis [3]. El uso de las cámaras cerradas es un procedimiento bien conocido para evaluar el intercambio de gases de un sector de suelo determinado y permite una caracterización más amplia del flujo de gases. Cabe recordar que la participación en el proyecto de Lubo et al., [3] ayudó a obtener las muestras de gases que hicieron factible la comparación entre sus mediciones y los resultados obtenidos con los sensores.

La arquitectura general de la WSN implementada (ver FIGURA 7) incluye cinco nodos sensores compuestos por: una tarjeta de desarrollo Arduino, los sensores en sí, el transceptor XBee® y la sección de energía (panel solar y batería de polímeros de litio), ubicados al lado de las cámaras. Estos elementos se colocaron en el cultivo de caña de azúcar para medir las variables deseadas.

Aunque inicialmente se planteó que los nodos sensores se soportaran en dos nodos maestros capaces de retransmitir la información hacia el punto final (donde se visualizaría), esta configuración se mejoró con un transceptor RF operando en la banda de 433 MHz y un solo repetidor; los módulos XBee® utilizan el set de estándares IEEE 802.15.4 para comunicarse y operan en la banda de 2.4 GHz, mientras que el repetidor opera en la banda de 433 MHz.



**Figure 7. Arquitectura general de la WSN**

No obstante, para los resultados presentados en este documento se implementó un escenario de comunicaciones entre el módulo XBee® en dos cámaras y un computador portátil con un módulo XBee® conectado vía USB en el cultivo de caña de azúcar. Esto se hizo dada la máxima distancia alcanzada por los módulos inalámbricos. Para este prototipo, los módulos XBee® alcanzaron un máximo de 25 metros, mientras que los módulos XBee® Pro tuvieron un alcance máximo de 150 metros. Con la implementación de la función de repetidor, el alcance máximo aumentó a 1.3 km.

La topología de red empleada estrella-árbol puesto que la información entre los nodos sensores es enviada a los maestros a través de un enlace sencillo. Se configuraron los nodos en modo de interfaz de programación de aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) para que pudieran enviar información al nodo maestro en tramas categorizadas y permitir así un mayor entendimiento de la información recibida en el nodo receptor utilizando el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*) por paquete. El modAPI permite además recibir una confirmación o ACK (*acknowledgement*) para cada paquete enviado.

Los componentes principales de la WSN se presentan en la TABLA 3, en ella es posible observar las variables a medir, los componentes requeridos para la construcción de la red y la cantidad de elementos requeridos. Como se mencionó, los sensores serán energizados por baterías de polímeros de litio (LiPo) y se soportarán en paneles solares para su recarga. Las variables

**Tabla 3. Elementos utilizados para la construcción de la WSN**

Cantidad	Descripción
5	Tarjeta de desarrollo Arduino Uno revisión 3
5	Shield Arduino XBee®
5	Módulo XBee® 2.4 GHz Serie 1
3	Módulo XBee® pro a 2.4 GHz Serie 1
3	Panel solar 0.5 W 55x70 mm
2	Panel solar 1 W 80x100 mm
3	Batería de LiPo 1000 mAh 3.7 V
2	Kit solar SeedStudio
2	Batería para nodo sensor 3.7 V 2000 mAh
1	Sensor de pH Haoshi pH ref. SEN0169
5	Sensor de CO2 ref. MQ-135
5	Sensor de agua SeedStudio ref. SEN11304P
5	Sensor de N2O ref. MSH-N2O/TC
5	Sensor de humedad de suelo SeedStudio. SEN92355P
5	Sensor de CH4 ref. MQ-4
1	Módulo para detectar gotas de lluvia ref. YL-83
1	Módulo inalámbrico HC-12
2	Antena Nagoya UT-106UV

medidas son: potencial de hidrógeno (pH), CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, intensidad de luz, humedad del suelo y detección de gotas de lluvia, ellas fueron seleccionadas por ser representativas de los GEI –son las que generalmente se miden para cuantificar la huella de carbono–. Las variables restantes complementan la información de los gases al caracterizar el estado actual del cultivo de caña de azúcar y ayudan a mejorar la precisión de las mediciones en los gases. Los subsistemas que conforman la WSN y algunas consideraciones para su configuración y uso, se presentan a continuación.

- Tarjeta de desarrollo. Se seleccionó la Arduino Uno (FIGURA 8) porque satisface los requerimientos relacionados con: sensores, compatibilidad con las extensiones (*shields*), poder de procesamiento, tamaño reducido y operación con baterías LiPo y paneles solares. La tarjeta Raspberry Pi fue descartada por ser más costosa, si bien ofrece una mayor potencia de procesamiento, la del Arduino Uno cubre adecuadamente lo requerido.



**Figura 8. Tarjeta Arduino utilizada**

- Sensores. Para su encapsulamiento y entierro –necesarios para evitar problemas en el cultivo–, se ubicó cada componente —excepto el panel solar y el sensor en sí— en un contenedor cerrado. Se realizaron mediciones dentro y fuera de las cámaras, por lo que los contenedores fueron sellados con pegamento líquido en la parte superior. La lista de sensores está incluida en la TABLA 3.

La FIGURA 9 corresponde al contenedor con los sensores, en ella se observa cómo los sensores se acomodaron por fuera y el panel solar en la parte superior. Dado que los nodos sensores están separados por una distancia máxima de 30 metros en línea de vista (LOS, *Line Of Sight*)

dentro del cultivo, los transceptores XBee® pudieron comunicarse sin importar que estuvieran dentro del contenedor. Si bien se presentó algo de desvanecimiento de la señal a causa de la altura de la caña de azúcar, en términos generales, la comunicación fue estable.



**Figura 9. Encapsulamiento de los sensores en los contenedores**

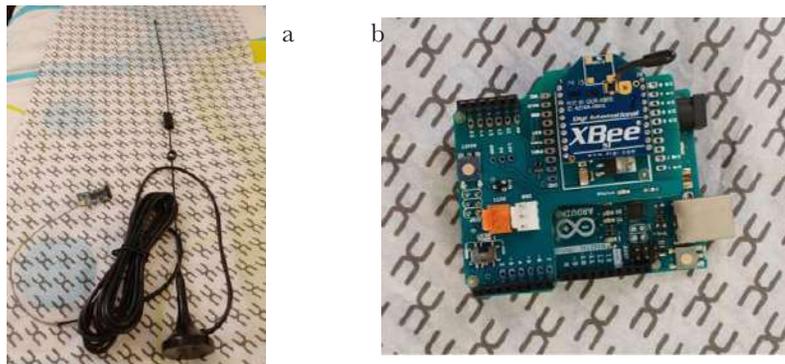
- Comunicación inalámbrica. Se utilizaron transceptores XBee® para los nodos sensores y un elemento RF para el repetidor con el fin de reunir: economía, confiabilidad, portabilidad y facilidad de uso en la red. Los nodos sensores próximos a las cámaras utilizaron un módulo XBee® serie 1 con un pequeño dipolo como antena. Dado que: el área de estudio fue de una hectárea de caña donde, los sensores se ubicaron próximos a las cámaras, y la distancia entre dicha ubicación y la casa principal fue de 2.26 km en LOS, fue necesario contar con un repetidor a la mitad del camino que asegurará la correcta comunicación entre los nodos sensores y el nodo maestro o receptor ubicado en la casa.

El repetidor empleó un módulo que opera a 433 MHz y una antena de alta ganancia, capaz de alcanzar distancias considerables. El transceptor de RF utilizado fue el HC-12 y se empleó junto con una antena Nagoya UT-106UV (ver FIGURA 10a).

Las tarjetas Arduino requirieron de un *shield* para montar los módulos XBee®, por ello se utilizó uno que permitió asegurar que los nodos

pudieran transmitir la información de los sensores; este tipo de *shield* no impidió el uso de pines analógicos en la tarjeta Arduino a la que se conectaron los sensores. En la FIGURA 10b se muestra el *shield* montado sobre la tarjeta de desarrollo.

- Energía. Se utilizó energía de baterías de LiPo con 1000 y 2000 miliamperios hora (mAh) de capacidad nominal y paneles solares para cargarlas de 80×100 mm capaces de proveer hasta un vatio (W) de potencia. Para la correcta operación de este subsistema (sin altibajos de energía en días soleados) y permitir la carga constante de la batería se empleó una tarjeta SeedStudio LiPo Rider Pro, la cual posee además un diodo emisor de luz (LED, *Light Emitting Diode*) que indica el nivel de carga de la batería (0%, 25%, 50%, 75% y carga completa), útil para conocer el estado del subsistema de energía y evitar potenciales fallas. La FIGURA 11 muestra estos dispositivos conectados entre sí.



**Figura 10. Subsistema de comunicación inalámbrica: (a) transceptor HC-12 RF y antena Nagoya; y (b) shield Arduino y módulo XBee**



**Figura 11. Subsistema de energía para los nodos WSN**

## PATRONES DE DISEÑO DEL SISTEMA

El término patrón de diseño fue tomado y adaptado de la ingeniería de software para describir exhaustivamente el código, los esquemáticos y los elementos utilizados en la red de sensores y crear plantillas para futuras actualizaciones del prototipo. De acuerdo con Shalloway y Trott [39], un patrón de diseño es una solución general y repetible para un problema de común ocurrencia en el diseño de software; esta solución no implica la implementación final de un proyecto, sino que es un elemento que puede transformarse buscando siempre la solución final para el cliente. El proyecto sigue este enfoque ya que su principal objetivo es proveer información para proyectos futuros y sentar una base con el código, los esquemáticos y la arquitectura propuesta.

## TOPOLOGÍAS

La topología utilizada para la WSN es un híbrido entre estrella y árbol, puesto que los nodos sensores en campo recolectan la información y la envían al nodo maestro y, eventualmente, el nodo maestro envía la información al repetidor, quien envía los datos al receptor final en la casa. En la FIGURA 12 se muestra la topología lógica de la red, en ella puede verse que hay dos nodos actuando como maestros: uno en el cultivo, recibiendo los datos de los sensores; otro actuando como repetidor para enviar la información a su destino final. Si bien en esta figura se puede notar la similitud con la topología en árbol, la diferencia radica en que los nodos envían información a un único punto de recepción. Asimismo, la FIGURA 12 puede suponer que la comunicación es unidireccional, sin embargo, es posible enviar ciertos comandos para solicitar el estado de los nodos desde el receptor. Entonces, aunque la comunicación fluya principalmente en dirección del receptor, este último puede enviar una pequeña cantidad de información para informar el estado de los nodos.

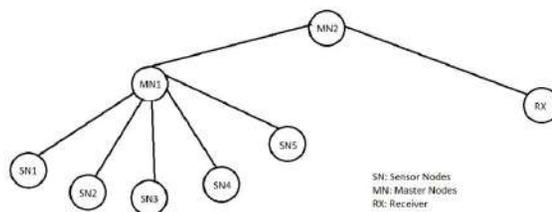


Figura 12. Topología lógica de la WSN

La topología física no presenta diferencias considerables con la topología lógica. Las principales modificaciones se relacionan con la ubicación exacta de los nodos en el cultivo de caña de azúcar: considerando que el área de estudio tiene una hectárea y es cuadrada, la posición de los sensores fue en la diagonal del área y la ubicación del nodo maestro cerca de una de las esquinas del rectángulo imaginario. Con esta decisión se asegura la correcta comunicación entre los nodos sensores y el maestro. El nodo maestro 2 (MN2 en la FIGURA 12) se ubicó en la parte alta de un árbol ubicado a 1 km en LOS del sensor más lejano, el cual a su vez se ubicó a 1.3 km del receptor final.

Los sensores en la caña de azúcar se ubicaron a una distancia aproximada de 30 metros entre ellos para asegurar la comunicación entre el dispositivo XBee® más débil y el nodo maestro. La FIGURA 13 presenta un esquemático de la topología física de la red. Es importante recordar por causa de la altura de caña (casi dos metros, como corresponde a su última etapa de crecimiento), se presentó un desvanecimiento considerable de las señales inalámbricas que generó una pequeña pérdida de paquetes, pero no afectó de manera considerable la transmisión de la información.

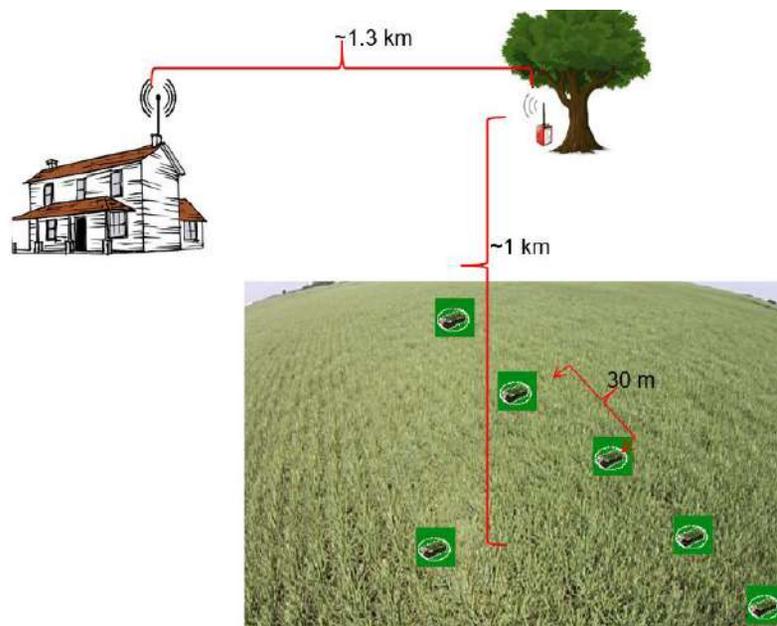


Figura 13. Esquemático de la topología física de la WSN

## LÓGICA EN EL CÓDIGO

Para la programación se utilizó el entorno de desarrollo integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) de Arduino, una aplicación software escrita en Java, basada en los lenguajes de programación Processing y Wiring. Los códigos generados en esta IDE se denominan bocetos (*sketches*), su extensión es “.ino”– y se caracterizan por presentar dos partes bien definidas: la inicialización, que como su nombre lo indica se ejecuta al dar inicio a las variables, selecciona además los puertos análogos que se utilizaran; y el bucle principal, que contiene las operaciones repetitivas, en el cual se toman las mediciones con un intervalo de cinco segundos por muestra y por sensor.

El sistema inicia con el sensor de gas MQ4, espera cinco segundos y toma la medida del sensor MQ135; espera otros cinco segundos y toma la medición del sensor de humedad, de detección de gotas de lluvia y finalmente de pH. Hacerlo de esta manera evita la sobrecarga de los sensores en la tarjeta y permite la correcta transmisión de la información (como efecto de la reducción de la probabilidad de colisión de paquetes). Esta IDE cuenta además con un amplio y actualizado soporte para librerías y una muy activa comunidad de desarrolladores que constantemente están realizando proyectos, con lo que se facilita la reutilización de códigos [40].

En la FIGURA 14 se presentan las partes del código donde se realizan las mediciones del sensor de humedad, el cual detecta: si hay agua en el suelo, si no hay rastro de agua y si el sensor está inmerso en agua. En la FIGURA 15 se muestra el código correspondiente a la medición de pH. La primera parte de él: muestrea las mediciones del sensor en un vector para suavizar los

```
A2_read = analogRead(A2); //reads the A2 analog port of the Arduino
Serial.print(A2_read);
Serial.print("\n");
intrange = map(A2_read, sensorMin, sensorMax, 0, 3); //maps the analog
scenario (0-1024) between three possible scenarios: minimal value of the
sensor, maximum value, and read value.
switch (range) {
case 0: // Wet soil
    Serial.println("Water in the soil with pH,NO");
    Serial.print("\n");
    break;
case 1: // Sensor getting wet
    Serial.println("Water in the soil with pH,YES");
    Serial.print("\n");
    break;
case 2: // Sensor in the water
    Serial.println("Sensor in water with pH,YES");
    Serial.print("\n");
    break;
}
delay(5000); // delay between reads
```

Figura 14. Medición de los valores en el sensor de humedad

```

for(int i=0;i<10;i++)//Get 10 sample values from the sensor for smooth
the value
{
buf[i]=analogRead(pHSensor);
delay(10);
}
for(int i=0;i<9;i++)//sort the analog from small to large
{
for(int j=i+1;j<10;j++)
{
if(buf[i]>buf[j])
{
temp=buf[i];
buf[i]=buf[j];
buf[j]=temp;
}
}
}
avgValue=0;
for(int i=2;i<8;i++)//take the average value of 6 center sample
avgValue+=buf[i];
float pHValue=(float)avgValue*5.0/1024/6; //convert the analog into
millivolt
pHValue=3.5*pHValue; //convert the millivolt into pH value
Serial.print("    pH,");
Serial.print(pHValue,2);
Serial.println(" ");
delay(5000);

```

**Figura 15. Lógica del sensor de pH**

valores; los organiza de menor a mayor; los convierte a milivoltios, porque es una medición análoga; y calcula el valor de pH dependiendo de dicho voltaje. Estas conversiones se requieren para calcular un valor más aproximado de pH en la superficie deseada. Como se mencionó, cada cinco segundos un sensor diferente envía sus resultados para evitar congestiones en la red y asegurar un correcto ACK de sus paquetes.

De acuerdo con Vaduva [41], la familia de sensores MQ-X requiere calibración para obtener valores precisos del gas medido. En este proyecto el tiempo de calibración fue de solo seis horas, primordialmente porque el día del muestreo estaba cerca del momento en que los sensores quedaron listos para ser construidos, lo que afectó los resultados, como se apreciará en la sección siguiente. Vaduva [41] además sugiere que la corriente mínima que estos sensores deberían manejar es de 150 miliamperios (típico) y de 250 como máximo.

Los sensores de gas operan al medir el cambio de un resistor interno de acuerdo con la concentración del gas que miden: si la concentración es alta, el valor de resistencia decrece y viceversa. Estos sensores presentan también un resistor de carga variable – que para este caso se ajustó en 4.4 k $\Omega$ –, por lo que es necesario calcular el valor  $R_0$ , que corresponde a la resistencia del sensor en un escenario externo común. La FIGURA 16 muestra el código que realiza

esta acción. Este valor de  $R_0$  se calculó para los sensores MQ-X utilizados en este proyecto. De acuerdo con Castro [42], los valores obtenidos de los sensores deben multiplicarse por dos y dividirse entre mil, considerando su propio  $R_0$ .

```
float sensor_volt;//Define variable for sensor voltage
float RS_air;//Define variable for sensor resistance
float R0;
float sensorValue;//Define variable for analog readings
for (int x = 0 ; x < 500 ; x++)
{
  sensorValue = sensorValue + analogRead(A0);//Add analog values of
  sensor 500 times
}
sensorValue = sensorValue / 500.0;//Take average of readings
sensor_volt = sensorValue * (5.0 / 1023.0);//Convert average to
voltage
```

Figura 16. Cálculo del resistor interno del sensor  $R_0$

## RESULTADOS

Como se indicó, al momento del muestreo la caña de azúcar presentaba una altura de entre 2 y 2.5 metros (estaba lista para corte), por lo que las pruebas de comunicación inalámbrica realizadas mostraron que la distancia máxima alcanzable por los módulos XBee® era de 75 metros. Por su parte, las pruebas con el transceptor HC-12 fueron exitosas, alcanzaron la distancia preestablecida que se mostró en la FIGURA 13. A continuación se detallan los resultados de: el análisis dentro de las cámaras, la estimación del flujo de gas y el análisis fuera de las cámaras.

### ANÁLISIS DENTRO DE LAS CÁMARAS

Los primeros datos capturados por los sensores presentaron un comportamiento similar a los niveles atmosféricos de los gases de efecto invernadero reportados por Lubo et al., [3], que fueron obtenidos a través de mediciones manuales y usando promedios históricos basados en la investigación de Blasing [43]. Todas las mediciones se efectuaron en julio de 2016 en dos cámaras y empleando un tiempo de muestreo de veinte minutos (el mismo tomado en el proyecto paralelo [3]). Además, se consideró el promedio de las mediciones de los GEI para presentar resultados más generales, puesto que los sensores midieron

valores cada cinco segundos, el promedio de los datos obtenidos es una buena aproximación general. Las mediciones se realizaron tanto dentro como fuera de las cámaras para asegurar la confiabilidad de los sensores en relación con las muestras evaluadas en laboratorio.

En la TABLA 4 se presenta la concentración promedio de los gases dentro de las dos cámaras en cada tiempo de muestreo. La temperatura se obtuvo con un termómetro digital insertado en las cámaras, el valor que se presenta en la tabla corresponde al promedio durante el tiempo de muestreo; los valores de GEI se expresan en partes por millón (ppm) –se realizó el cálculo de la correspondiente operación aritmética para el valor de  $R_O$ -. En la tabla se observa cómo la tendencia promedio de los tres gases evaluados en la cámara I tiende a reducir con el tiempo. Considerando que las cámaras permanecieron siempre selladas, es posible que este comportamiento haya sido causado por la falta de interacción entre las partículas en el entorno cerrado. Aún cuando los resultados en la cámara II difieren en cuanto a los niveles de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , las concentraciones de  $\text{CO}_2$  mostraron siempre una tendencia a disminuir. Como se puede observar, las concentraciones en las cámaras presentan valores cercanos a los niveles atmosféricos reportados por Blasing [43] (este contraste se presenta en la sección Discusión). Por otra parte, se observa la tendencia creciente de los valores de temperatura, lo que puede explicarse por las condiciones atmosféricas de ese día (claras, con poca nubosidad), las cuales permitieron una mayor exposición de las cajas a los rayos del sol.

**Tabla 4. Valores promedio de GEI al interior de las cámaras y nivel atmosférico [43]**

<i>Tiempo de muestreo</i>	Temperatura (°C)		$\text{CH}_4$ (ppm)		$\text{N}_2\text{O}$ (ppm)		$\text{CO}_2$ (ppm)	
	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>
7:16 a.m. a 7:36 a.m.	21.6	21.8	1.58	1.15	0.546	0.592	386	306
7:36 a.m. a 7:56 a.m.	21.7	22.6	1.35	1.11	0.103	0.610	276	298
7:56 a.m. a 8:16 a.m.	22.0	23.2	1.29	1.15	0.101	0.648	254	264
8:16 a.m. a 8:36 a.m.	22.2	23.6	0.85	1.42	0.100	0.777	250	245
Niveles atmosféricos	23.1		1.833		0.3282		399	

## ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE GAS

Con el fin de evaluar la potencial huella de carbono de los procesos asociados en el lote de caña de azúcar estudiado y obtener un punto de vista más amplio

que el que se presenta por las mediciones en ppm de los gases, se usó el procedimiento descrito por Jantalia, dos Santos, Urquiaga, Boddey y Alves [44], para calcular el flujo de gases con la técnica de cámara cerrada. El cálculo de esta información es un buen indicador de las potenciales emisiones por hectárea de los GEI evaluados y puede ser útil para proponer procedimientos alternativos que reduzcan sus emisiones.

Con los datos previos y dicho procedimiento es posible estimar el flujo de emisión de gases por hora y día. Este procedimiento emplea una regresión lineal entre las concentraciones mostradas en la TABLA 4 (los datos a evaluar) con el tiempo transcurrido de muestreo (en intervalos de veinte minutos) y calcula la tasa de emisión por cámara como la pendiente de la regresión lineal.

En el procedimiento usado, las muestras de tiempo se convierten a tiempo transcurrido en horas (veinte, cuarenta, sesenta y ochenta minutos, corresponden a 0.33, 0.66, 1 y 1.33 horas, respectivamente). A modo de ejemplo, utilizando como referencia la presencia de metano ( $\text{CH}_4$ ) en la cámara 1, los datos que solucionan la regresión son: 1.58, 1.35, 1.29 y 0.85 ppm de  $\text{CH}_4$ , para 0.33, 0.66, 1 y 1.33 horas respectivamente. La abscisa corresponde al tiempo en horas y la ordenada al valor de metano en ppm (ver FIGURA 17). La tasa de emisión por cámara corresponde a la pendiente de la regresión, en este caso  $-0.6753 \text{ [g/(m}^2 \times \text{h)]}$ .

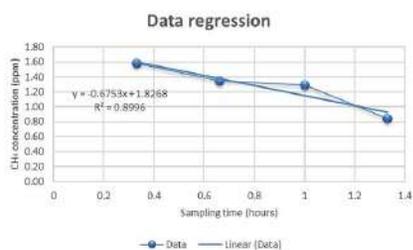


Figura 17. Ejemplo de regresión de datos

De acuerdo con Jantalia et al., [44] la ECUACIÓN 1 convierte los valores, de ppm/h a gramos/m<sup>2</sup>/ hora.

$$E = \left( \frac{d}{dt} (\text{gas}) \right) \times \frac{VM}{AV_m} \quad (1)$$

donde.

$E$  es la emisión del gas evaluado;

$(d/dt) \times \text{gas}$  es la tasa de acumulación del gas expresada en ppm/h;

$V$  es el volumen de la cámara expresado en  $l$ ;

$M$  es la masa del gas expresada en  $g/mol$ ;

$A$  es el área de la cámara expresada en  $m^2$ ; y

$V_m$  es el volumen molar del gas expresado en ppm/h.

Para determinar el volumen molar del gas se empleó la ley de gas ideal (ECUACIONES 2 y 3).

$$PV_m = nRT \quad (2)$$

$$V_m = \frac{nRT}{P} \quad (3)$$

donde.

$P$  es la presión ( $1 \text{ atm}$ );

$n$  es el número de moles ( $1 \text{ mol}$ );

$R$  es la constante de los gases ( $0.08206 \times (L \times atm / K \times mol)$ ); y

$T$  es la temperatura ( $273.1 \text{ K}$ ).

Empleando el valor promedio de la temperatura en ambas cámaras ( $21.9 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente), la ECUACIÓN 3 se convierte en:

$$V_m = 0.08206 \times (273.1 + ^\circ\text{C})$$

y las emisiones del gas evaluado se calculan de acuerdo con la ECUACIÓN 4, donde  $E_{ch}$  es el resultado de la tasa de emisión por cámara (la pendiente de la regresión lineal).

$$E = \frac{E_{ch}}{1 \times 10^6} \times \frac{VM}{AV_m} \quad (4)$$

Como resumen, en la TABLA 5 se presentan los resultados del flujo de gas dentro de cada cámara y para cada GEI evaluado. El flujo se calculó dentro de las cámaras porque hacerlo así permite el cálculo de las potenciales emisiones de GEI del suelo, lo que conlleva a la obtención de una medición aproximada de la contribución del suelo a la huella de carbono a través de los gases generados en el área evaluada.

**Tabla 5. Valores de flujo de gas al interior de las cámaras**

Gas	Tasa de emisión / cámara (ppm/h)		Volumen de la cámara (l)		$V_m$ (l/mol)		Emisiones / hora (g/m <sup>2</sup> x h)		Emisiones / día / Ha (g/ha x day)	
	Cam.I	Cam.II	CamI	CamII	CamI	CamII	Cam.I	Cam.II	Cam.I	Cam.II
CH <sub>4</sub>	-6.75x10 <sup>-1</sup>	2.54x10 <sup>-1</sup>	7.347	7.854	24.29	24.29	-5.01x10 <sup>-5</sup>	1.88x10 <sup>-5</sup>	-1.20x10 <sup>1</sup>	4.51x10 <sup>0</sup>
N <sub>2</sub> O	-4.00x10 <sup>-1</sup>	1.77x10 <sup>-1</sup>	7.854	7.347	24.29	24.29	-6.92x10 <sup>-5</sup>	3.07x10 <sup>-5</sup>	-1.66x10 <sup>1</sup>	7.37x10 <sup>0</sup>
CO <sub>2</sub>	-1.29x10 <sup>2</sup>	-6.50x10 <sup>1</sup>	7.601	7.601	24.29	24.29	-9.53x10 <sup>-3</sup>	-4.82x10 <sup>-3</sup>	-2.29x10 <sup>3</sup>	-1.16x10 <sup>3</sup>

Estos resultados indican que en la cámara 1 se presentó una absorción de los tres GEI evaluados (dados los resultados negativos en su última columna: 12 g de CH<sub>4</sub>, ~17 g de N<sub>2</sub>O y ~2.3 kg de CO<sub>2</sub> por día. Por otra parte, se observó un incremento en el flujo de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para la cámara 2, mientras que el potencial de absorción de CO<sub>2</sub> se mantuvo. Lo anterior puede explicarse por la ubicación de la cámara 1, pues es posible que en ese lugar exacto se haya aplicado una mayor cantidad de fertilizantes orgánicos, lo que generaría una mayor fijación de nitrógeno; sin embargo, las diferencias no son muy significativas y la tendencia es constante.

Los datos de volumen de las cámaras son algo diferentes puesto que estas se enterraron en el lote de caña de azúcar y la profundidad de los bordes no fue la misma para todas. Las mediciones de la altura desde el piso hasta el tope de la cámara fue la utilizada para calcular su volumen aproximado.

Los resultados en la TABLA 5 indican que la caña de azúcar puede ser considerada como una importante fuente de reducción de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, pero es necesario considerar los otros GEI y la razón de sus valores de concentración. Citando datos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climatic Change), el potencial de calentamiento global (GWP, *Global Warming Potential*) de los gases evaluados toma como referencia el valor del CO<sub>2</sub>, sin embargo, el CH<sub>4</sub> presenta un GWP

25 veces mayor y el  $N_2O$  tiene un GWP 298 veces mayor que el del  $CO_2$  [45]. Como se trabajó sobre una plantación orgánica de caña de azúcar, la principal fuentes de estos gases fue la materia orgánica (gallinaza, etc.) utilizada como fertilizante. Igualmente, las mediciones de flujo se realizaron únicamente dentro de las cámaras, puesto que la caracterización más relevante de los GEI en el cultivo se da dentro de ellas.

### ANÁLISIS FUERA DE LAS CÁMARAS

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos por los sensores con los datos recolectados con un dispositivo especial empleado en el proyecto paralelo [3], se tomaron algunas medidas fuera de las cámaras utilizando un Lutron GCH-2018, un dispositivo capaz de medir concentraciones de  $CO_2$  en un área específica, que había sido utilizados por Lubo et al., [3] para guardar valores históricos de las concentraciones de  $CO_2$  en la atmosfera durante los días de muestreo. Este dispositivo tomó una muestra cada ocho segundos, de ellas: el valor máximo de  $CO_2$  alcanzado fue de 504 ppm; el mínimo, de 281 ppm; y el promedio, de 366 ppm (ver comportamiento en la FIGURA 18).

La TABLA 6 presenta los datos de los sensores para los GEI evaluados fuera de las cámaras. Al comparar las cifras, es claro que las concentraciones fueron mayores fuera de las cámaras, que dentro de ellas, lo que puede explicarse porque los valores de gas pueden afectarse por fenómenos externos (viento, temperatura, humedad y fuentes artificiales) cerca del punto de medición.

Al comparar los valores de  $CO_2$  obtenidos con el Lutron (FIGURA 18) y los de la TABLA 6, se puede inferir que el rango de los sensores se ubicó entre los valores máximo, mínimo y promedio de la figura. Sin embargo, los datos

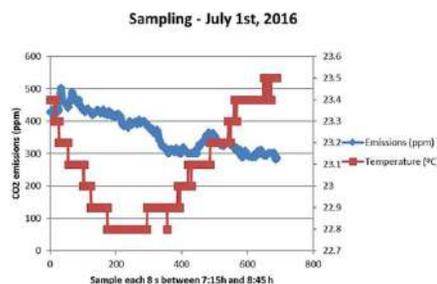


Figura 18. Valores de  $CO_2$  y temperatura en el Lutron GCH-2018

**Tabla 6. Valores de los sensores promedio de GEI fuera de las cámaras [43]**

<i>Tiempo de muestreo</i>	Temperatura (°C)		CH <sub>4</sub> (ppm)		N <sub>2</sub> O (ppm)		CO <sub>2</sub> (ppm)	
	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>	<i>Cam.I</i>	<i>Cam.II</i>
7:16 a.m. a 7:36 a.m.	21.6	21.8	1.02	1.78	0.419	0.650	436	165
7:36 a.m. a 7:56 a.m.	21.7	22.6	1.02	1.26	0.606	0.680	530	250
7:56 a.m. a 8:16 a.m.	22.0	23.2	1.01	1.40	0.614	0.640	536	267
8:16 a.m. a 8:36 a.m.	22.2	23.6	1.02	1.30	0.560	0.600	495	299
Niveles atmosféricos	23.1		1.833		0.3282		399	

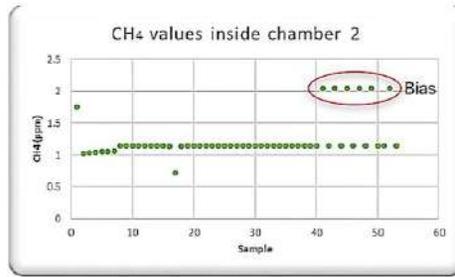
de la figura se muestrearon cada ocho segundos, lo que asegura una mayor precisión que la obtenida por los sensores, pues estos realizaron un muestreo aproximadamente cada minuto por gas. Las concentraciones atmosféricas medidas fuera de las cámaras presentaron resultados mixtos: la cámara 1 mostró concentraciones más altas de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, pero menores de metano, mientras que en la cámara 2 los valores de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> fueron menores, y los de N<sub>2</sub>O mayores, en comparación con los valores teóricos descritos en la tabla (niveles atmosféricos). Esta situación se puede explicar por una posible desconfiguración de los sensores ubicados por fuera de la cámara 2 debido a un inadecuado tiempo de precalentamiento. Sin embargo, los valores tienden a estabilizarse al final del tiempo de muestreo.

Al comparar los datos de las TABLAS 4 y 6 se observa que los valores de CO<sub>2</sub> son los que mayor diferencia presentan (~200 ppm), mientras que los otros dos gases muestran resultados similares a los atmosféricos.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### LECCIONES APRENDIDAS

Dada la baja correlación entre los datos obtenidos por los sensores y los datos atmosféricos, es lógico pensar que durante las mediciones se presentó algún tipo de sesgo. En el desarrollo de este prototipo se observó un elevado consumo de corriente relativa a la corriente total provista por la tarjeta Arduino por parte de los sensores MQ4 y MQ135. Los datos obtenidos por ellos presentaron en ocasiones valores fuera del rango promedio. En la FIGURA 19, donde se presenta el comportamiento de los valores de metano dentro de la cámara II, se puede apreciar un sesgo de hasta dos veces el valor promedio.



**Figura 19. Sesgo presente en las mediciones**

Estos datos con sesgo probablemente causaron los resultados no relacionados de CO<sub>2</sub> en la TABLA 6. La hoja de especificaciones del sensor MQ4 indica que la máxima corriente de operación es de 250 mAh, con un valor nominal o recomendado de 150 mAh [46]. Dado que los Arduinos utilizaron seis entradas analógicas, la demanda de corriente distribuida en cada sensor pudo superar dichos valores para los sensores de gas, causando, cuando ello ocurrió, la aparición del sesgo.

Por otra parte, durante la ejecución de las pruebas con los sensores se ejecutó la recolección de muestras de gas dentro de las cámaras para su análisis en un laboratorio especializado. El procedimiento para obtener los resultados se describe en Lubo et al., [3] y el análisis de resultados se muestra en la TABLA 7 con un formato similar al de los datos obtenidos por los sensores. Comparando los resultados de esta tabla con los obtenidos por los sensores (ver TABLAS 4 y 6), se observa que las concentraciones de CO<sub>2</sub> son las más distantes entre los análisis de laboratorio y los resultados de los sensores (1.979 ppm vs. 386 ppm, respectivamente, para los valores más altos).

En general, las mediciones de los sensores fueron considerablemente menores que las analizadas en el laboratorio, lo que indica que la calibración de los

**Tabla 7. Valores promedio de los GEI evaluados y analizados en el laboratorio**

Tiempo de muestreo	Temperatura (°C)		CH <sub>4</sub> (ppm)		N <sub>2</sub> O (ppm)		CO <sub>2</sub> (ppm)	
	Cam.I	Cam.II	Cam.I	Cam.II	Cam.I	Cam.II	Cam.I	Cam.II
7:16 a.m. a 7:36 a.m.	21.6	21.8	2.68	2.66	0.368	0.328	658	642
7:36 a.m. a 7:56 a.m.	21.7	22.6	2.49	2.48	0.433	0.379	1212	1011
7:56 a.m. a 8:16 a.m.	22.0	23.2	2.41	2.43	0.330	0.404	1686	1379
8:16 a.m. a 8:36 a.m.	22.2	23.6	2.42	2.33	0.414	0.455	1979	1718

sensores no fue la mejor, pues un problema en el funcionamiento del equipo especializado es menos probable. Si se ejecuta un análisis del flujo de gases a los datos de la TABLA 7, los resultados serán muy diferentes a los datos de los sensores. Si se da como válida la hipótesis de la incorrecta calibración de los sensores, se puede afirmar que:

- la calibración no fue apropiada porque sólo operaron en periodos intermitentes antes del muestreo, cuando el periodo de precalentamiento es de 48 horas;
- el sesgo en las mediciones de los sensores de gas pudo haber afectado los resultados globales, pues dichos valores fueron hasta cuatro veces mayores a los realmente medidos por los sensores; y
- el sesgo fue causado por la alta demanda de corriente de los sensores de gas, la que forzó a la tarjeta Arduino a fallar momentáneamente.

Para los siguientes prototipos, se plantea encarar estos problemas a través de las siguientes propuestas:

- asegurar una correcta calibración de los sensores MQ con un mínimo de precalentamiento de 24 horas antes de las medidas, esta calibración se puede llevar a cabo en cualquier lugar, no necesariamente en el lugar exacto donde se realizará la medición;
- implementar un juego de transistores para incrementar la potencia y corriente eléctrica que los Arduino proveen a los sensores; y
- utilizar un juego de sensores no susceptibles al sesgo, probablemente tipo industrial (esto afectaría el costo del prototipo, por lo que debe ser sopesado).

Aunque las mediciones realizadas en este proyecto están en concordancia con los niveles atmosféricos, no se pueden emplear para concluir acerca del adecuado rendimiento de los sensores, para ello se requieren más estudios y pruebas que permitan afirmar algo acerca de su comportamiento real en el entorno colombiano. Sin embargo, si es posible afirmar que el diseño y la construcción y operación de una red de sensores inalámbricos es factible, incluso con dispositivos de bajo costo y prestaciones medias.

Las principales consideraciones a tener en cuenta para futuros desarrollo se relacionan con la calibración de los sensores, la encapsulación de los elementos (para asegurar una correcta impermeabilidad) y la selección de las tecnologías

inalámbricas, dependiendo de la cantidad de información que se vaya manejar y de las variables que se vayan a medir.

## CONCLUSIONES

Se puede afirmar que los objetivos propuestos se cumplieron a pesar de las debilidades evidenciadas con los resultados. La implementación de la WSN no solo hizo posible obtener los resultados descritos, sino que sirvió además para identificar aspectos por mejorar que hubiera sido imposible descubrir y considerar sin la implementación física. Para mayores detalles, se recomienda consultar el documento original de la tesis preparada con este proyecto [47].

En particular, el nivel de logro de los objetivos específicos fue alto ya que fue posible definir los requerimientos para la WSN, al definir la topología, determinar y obtener los valores de GEI y evaluar los datos contra los procesados en laboratorio. El prototipo desarrollado cumplió además con buena parte de los requerimientos (funcionales y no funcionales): los datos se obtuvieron y transmitieron correctamente, no hubo escenarios con elevada latencia, los sensores operaron incluso sin luz solar directa y la información obtenida es potencialmente útil para el personal en la granja. Sin embargo, es claro que se requieren algunas mejoras en aspectos de confiabilidad, presentación y manejo de los datos. Los requerimientos no funcionales se confirmaron como posibles sugerencias para futuros prototipos, más allá de que el relacionado con el canal inalámbrico en áreas rurales se alcanzó: utilizando transceptores a 433 MHz y 2.4 GHz no se presentaron mayores interferencias en el área de estudio, lo que facilitó el proceso de comunicación.

Los resultados de este proyecto de investigación representan un aporte al estudio de la agricultura de precisión, en particular al uso de sensores inalámbricos como una herramienta para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, una tendencia que está empezando a ser aplicada en diversos cultivos, por asociaciones, cultivadores y entidades gubernamentales.

El proyecto presentó una propuesta de WSN aplicable a cultivos de caña de azúcar, enfocada en la medición de los tres GEI más relevantes: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>. Los primeros resultados mostraron que las concentraciones de estos gases están relacionadas con los valores atmosféricos y que tienden a disminuir con el tiempo, ya sea fuera o dentro de las cámaras empleadas. Aunque se presentó un sesgo en las mediciones –por causas ya explicadas–, los valores obtenidos

fueron, en general, adecuados y estuvieron en concordancia con los valores esperados. No obstante, cuando se realizó una comparación entre los datos de los sensores y los datos analizados en laboratorio, se observaron diferencias considerables: hasta de 1.600 ppm en las concentraciones de CO<sub>2</sub> y hasta un 300% en los cálculos de flujo de gases. Estas deficiencias fueron útiles para identificar la necesidad de mejorar temas como la calibración de los sensores y la provisión de corriente eléctrica para su uso.

El proyecto permitió identificar también que los módulos XBee® no son adecuados para condiciones donde los obstáculos son lo suficientemente densos para afectar la cobertura. Para el caso evaluado, la altura de la caña de azúcar redujo la cobertura alcanzada (hasta 75 metros en promedio, con un caso aislado de 90 metros). Con la utilización de varios transceptores se alcanzaron distancias de hasta 1 km, por lo que esta opción se transforma en un requerimiento para futuras versiones del prototipo.

Además de lo dicho, para futuras implementaciones valdría la pena considerar la implementación de un servidor web para almacenar la información, y pensar en la medición –usando una versión mejorada del prototipo–, de otras variables relevantes en otros cultivos: arroz, frutas, vegetales enterrados, etc.

## REFERENCIAS

- [1] Food and Agriculture Organization for the United Nations, “FAO Statistical Yearbook 2013: World food and agriculture,” Rome, 2013.
- [2] Y. S. Tey and M. Brindal, “Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications,” *Precis. Agric.*, vol. 13, no. 6, pp. 713–730, Jul. 2012.
- [3] C. Lubo, L. Rodríguez, J. Abadía, O. Orozco, B. Sierra, G. Llano y A. López, “Sugar cane crop carbon footprint. A contrast between an organic crop, a transition to organic crop and a traditional crop,” presented at the 5th International Ecosummit Congress, Montpellier, France, 2016.
- [4] S. Balaji and M. Murugaiyan, “Waterfall Vs V-Model Vs Agile: a Comparative Study on SDLC,” *Int. J. Inf. Technol. Bus. Manag.*, vol. 2, pp. 26–30, Jun. 2012.
- [5] B. Zeidman, “The Universal Design Methodology--Taking hardware from conception through production,” *EDN*, vol. 47, no. 28, pp. 53–55, 2002.
- [6] O. Ulgen, J. Black, B. Johnsonbaugh, and R. Klunge, “Simulation Methodology - A Practitioner’s Perspective.” 24-Nov-2015.

- [7] “Delmar Cengage Learning Companions - Precision Agriculture,” 19-Mar-2016. [Online]. Available: [http://www.delmarlearning.com/companions/content/140188105X/trends/history\\_pre\\_agr.asp](http://www.delmarlearning.com/companions/content/140188105X/trends/history_pre_agr.asp). [Accessed: 19-Mar-2016].
- [8] Q. Zhang, *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. Taylor & Francis, 2015.
- [9] O. Orozco and G. Llano, “Information Systems based on Precision Agriculture, Sugarcane Case Study,” in *Memorias del I Workshop de Tecnologías de la Información y la Comunicación Aplicadas a la Agricultura*, Popayán, Cauca, 2015, pp. 35–41.
- [10] Information Resources Management Association, *Networking and Telecommunications: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. Idea Group Inc (IGI), 2010.
- [11] I. Colomina and P. Molina, “Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 92, pp. 79–97, Jun. 2014.
- [12] R. G. V. Bramley, “Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application,” *Crop Pasture Sci.*, vol. 60, no. 3, pp. 197–217, 2009.
- [13] R. D. (Robert D. Grisso, M. M. Alley, P. McClellan, D. E. Brann, and S. J. Donohue, “Precision Farming. A Comprehensive Approach,” *A Comprehensive Approach*, May 2009.
- [14] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, 2010.
- [15] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Comput. Netw.*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [16] eréal, “PFC: Design and implementation of a dynamic Wireless Sensor Network,” B105 lab, 04-Jun-2013. .
- [17] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone, “An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution,” *Sensors*, vol. 9, no. 9, pp. 6869–6896, Aug. 2009.
- [18] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Comput. Netw.*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, Aug. 2008.
- [19] P. Baronti, P. Pillai, V. W. C. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, “Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards,” *Comput. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, May 2007.
- [20] A. Pascale, M. Nicoli, F. Deflorio, B. D. Chiara, and U. Spagnolini, “Wireless sensor networks for traffic management and road safety,” *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 67–77, Mar. 2012.
- [21] L. Grivet and P. Arruda, “Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop,” *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 5, no. 2, pp. 122–127, Apr. 2002.
- [22] J. . Paturau, “Alternative Uses of Sugarcane and its Byproducts in Agroindustries.” [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/003/s8850e/s8850e03.htm>.

- [23] S. Arango, A. M. Yoshioka, and V. Gutierrez, *Análisis del ambiente competitivo del Cluster Bioindustrial del Azúcar en el valle geográfico del río Cauca: Desarrollo y retos*, 1st ed., vol. 1. Santiago de Cali: Multimedios Javeriana Cali, 2011.
- [24] Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, “Aspectos Generales del Sector Azucarero 2014-2015.” Jun-2015.
- [25] B. Kitchenham and S. Charters, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering,” 2007.
- [26] O. A. Orozco and G. Llano, “Sistemas de Información enfocados en Tecnologías de Agricultura de Precisión y aplicables a la Caña de Azúcar, una Revisión.,” *Ingenierías*, vol. 28, no. 16, pp. 1–18, Jan-2016.
- [27] J. Cock, T. Oberthür, C. Isaacs, P. Roman-Läderach, A. Palma, J. Carbonelle, J. Victoria, G. Watts, A. Amaya, L. Collet, G. Lema, y E. Anderson, “Crop management based on field observations: Case studies in sugarcane and coffee,” *Agric. Syst.*, vol. 104, no. 9, pp. 755–769, Nov. 2011.
- [28] J. A. M. Demattê, J. L. I. Demattê, E. R. Alves, R. Negrão, and J. L. Morelli, “Precision agriculture for sugarcane management: a strategy applied for brazilian conditions,” *Acta Sci. Agron.*, vol. 36, no. 1, pp. 111–117, Mar. 2014.
- [29] D. Palma, S. Salgado, J. Obrador, A. Trujillo, L. Lagunes, J. Zavala, A. Ruiz, y M. Carrera, “Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF),” *Terra*, vol. 20, no. 3, pp. 347-358, 2002.
- [30] F. Urbano, “Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia,” *J. Cienc. E Ing.*, vol. 5, no. 1, pp. 46–52, 2013.
- [31] K. A. Sudduth, S. T. Drummond, and N. R. Kitchen, “Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 31, no. 3, pp. 239–264, May 2001.
- [32] T. Kalaivani, A. Allirani, and P. Priya, “A survey on Zigbee based wireless sensor networks in agriculture,” in *2011 3rd International Conference on Trendz in Information Sciences and Computing (TISC)*, 2011, pp. 85–89.
- [33] J. Hwang, C. Shin, and H. Yoe, “Study on an Agricultural Environment Monitoring Server System using Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11189–11211, Dec. 2010.
- [34] J. Burrell, T. Brooke, and R. Beckwith, “Vineyard computing: sensor networks in agricultural production,” *IEEE Pervasive Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 38–45, Jan. 2004.
- [35] W. Hu, T. Le, P. Corke, y S. Jha, “Outdoor sensornet design and deployment: experiences from a sugar farm,” *IEEE Pervasive Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 82–91, 2012.
- [36] A. L. Guedes et al., Guedes, A. L., Moreira, M., França, M. B. D. M., de França, J. A., Piai, J. C., e Silva, M. A. D. A., & Canteri, M. G “A Distributed and Wireless Data

- Acquisition System to Fight Against Sugarcane Orange Rust,” *J. Control Autom. Electr. Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 831–842, Aug. 2013.
- [37] M Diago y J. Carbonel, “Communications system for a soil monitoring network in Valle del Cauca, Colombia,” in *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*, 2015, pp. 1–5.
- [38] M. Dabbagh and S. P. Lee, “An Approach for Integrating the Prioritization of Functional and Nonfunctional Requirements,” *Sci. World J.*, vol. 2014, p. e737626, Apr. 2014.
- [39] A. Shalloway and J. R. Trott, *Design Patterns Explained: A New Perspective on Object-Oriented Design*, 2nd ed. Pearson Education, 2004.
- [40] The Arduino Company, “Arduino Software (IDE), Arduino Environment,” 30-Mar-2017. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>. [Accessed: 30-Mar-2017].
- [41] L. Vaduva, “MQ4 Gas Sensor – Methane Natural Gas monitor with MQ3 / MQ4 sensors,” MQ4 Gas Sensor – Methane Natural Gas monitor with MQ3 / MQ4 sensors, 05-Dec-2016. [Online]. Available: <http://www.geekstips.com/mq4-sensor-natural-gas-methane-arduino/>. [Accessed: 03-Apr-2017].
- [42] M. Castro, “Understanding a Gas Sensor,” Understanding a Gas Sensor, 09-May-2016. [Online]. Available: <http://www.jayconsystems.com/tutorials/gas-sensor-tutorial/>. [Accessed: 03-Apr-2017].
- [43] T. J. Blasing, “Recent Greenhouse Gas Concentrations,” Jul. 2009.
- [44] C. P. Jantalia, H. P. dos Santos, S. Urquiaga, R. M. Boddey, y B. J. Alves, “Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil,” *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, vol. 82, no. 2, pp. 161–173, Apr. 2008.
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change, “IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007,” Direct Global Warming Potentials, 2007. [Online]. Available: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html). [Accessed: 04-Apr-2017].
- [46] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd, “Flammable Gas Sensor (MQ-4 Model),” MQ-4 Ver 1.3 - Manual, 19-Mar-2016. [Online]. Available: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>.
- [47] O. Orozco. Wireless sensor network focused on the monitoring of climatic variables and greenhouse gases in an organic sugarcane crop [tesis de maestría]. Cali, Colombia: Universidad Icesi.



La preparación de este libro estuvo al cuidado de Claros Editores S.A.S. y finalizó en julio de 2019. En su preparación, realizada desde la Editorial Universidad Icesi, se emplearon los tipos: Baskerville MT Std de 9, 10 y 12 puntos; Book antigua de 8 puntos; Cambria Math de 12 puntos; Gill Sans MT de 8, 9, 10, 14, 19, 26 puntos; y Times New Roman de 10 puntos.



En la colección “Bitácoras de la Maestría” se presentan los resultados de las investigaciones base del desarrollo de tesis meritorias, inicialmente provenientes de la Facultad de Ingeniería. El primer capítulo de “Movilidad – Gestión de espectro – Agricultura de precisión”, el primer libro de esta colección, corresponde a una investigación sobre sistemas inteligentes de transporte (ITS) que utiliza Internet de las Cosas como tecnología habilitante. En ella, los investigadores: desarrollan una metodología para el diseño de una arquitectura ITS apropiada para ciudades intermedias; identifican la secuencia requerida para el diseño y desarrollo de servicios de ITS basados en dicha arquitectura; y diseñan y prueban uno. El segundo capítulo está enfocado en las técnicas asociadas con el uso del espectro radioeléctrico, en él se presenta el desarrollo de una propuesta de localización en redes inalámbricas que reduce la cantidad de sensores involucrados en el proceso de cálculo de la ubicación de un transmisor no colaborativo en entornos exteriores. La propuesta se basa en el uso de motores de juegos como herramienta de simulación y en la técnica de lanzamiento de rayos para el modelado del canal. El libro cierra con un trabajo de investigación en agricultura de precisión realizado en un cultivo orgánico de caña de azúcar. Se trata del diseño de una red de sensores inalámbricos destinada a medir algunas variables climatológicas, el pH del suelo y los niveles de tres gases de efecto invernadero, construida a partir de materiales de bajo costo y con tecnología de código abierto. Su objetivo es contribuir al uso eficiente de los recursos productivos y a la reducción de la huella de carbono de la actividad agrícola.