

Nota de Aceptación:

Proyecto de Diseño Aprobado. en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.

Camilo Rocha

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias

Jorge Enrique Álvarez Patiño

JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial

Fabián Andrés Castaño Giraldo

FABIÁN ANDRÉS CASTAÑO GIRALDO
Director Proyecto de Diseño

Daniel Morillo Torres

DANIEL MORILLO TORRES
Jurado 1

John W. Escobar

JOHN WILLMER ESCOBAR
Jurado 2

Santiago de Cali, 22 de noviembre de 2021

Señor
Álvaro Figueroa
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad
Javeriana
Sede Cali

Asunto: Aval de documento final PD

Cordial saludo,

Como director del proyecto de diseño con código **2021104**, titulado: “Diseño de modelo de optimización para localización de red de sensores de detección temprana de incendios en el Bosque La Primavera”, elaborado por los estudiantes, **Felipe Domínguez, Juan Esteban López, Juan José Osorio y Nataly Rojas** el cual en una primera instancia aprobé sujeto a correcciones, **certifico** que, conforme a la segunda revisión, los estudiantes han realizado las correcciones solicitadas y, teniendo en cuenta el estado actual del documento, **apruebo** el contenido del proyecto puesto que cumple con los requisitos mínimos estipulados en el reglamento vigente.

Gracias por su atención.

Atentamente,



--
Fabián Castaño

Diseño de modelo de optimización para localización de red de sensores de detección temprana de incendios en el Bosque La Primavera

Felipe Domínguez Herrera^{a,c}, Juan Esteban López David^{a,c}, Juan José Osorio Navia^{a,c}, Nataly Rojas Daza^{a,c}

Fabian Andrés Castaño Giraldo^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

Resumen

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido el desarrollo de pequeños dispositivos capaces de medir las condiciones del ambiente, las llamadas redes de sensores inalámbricos, que tienen una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos. Actualmente en la región de Jalisco, México, la incidencia de incendios forestales ha aumentado hasta el punto de representar un riesgo para el medio ambiente y los habitantes de la región. Debido a esto, en el Bosque La Primavera se adelanta un proyecto para implementar un sistema de detección temprana integrando una red de sensores inalámbricos con drones. Con el fin de minimizar el tiempo hasta detección, este proyecto se enfoca en diseñar un modelo de optimización para definir la localización de una red de sensores inalámbricos; lo que se conoce en optimización como el Problema de Localización de Máxima Cobertura. Para ello se realizó un análisis de las condiciones actuales, en las que se evaluó el tiempo promedio de detección, porcentaje promedio de área forestal quemada, costo del sistema de detección de incendios y tiempo de ejecución del estudio. El presente proyecto propone un modelo de optimización estocástica como solución. Para la validación del modelo se realizaron experimentos aleatorios y estudios estadísticos que comprueban que el modelo cumple con las restricciones y metas propuestas. Mejorando el tiempo de detección promedio en un 43,48%, el porcentaje promedio de áreas quemada en un 43,30% y los costos de implementación en un 22,35%, asimismo, el tiempo de ejecución se logró reducir a solo 6,63 segundos en promedio.

Palabras claves: Sistema de detección temprana de incendios, Red de sensores inalámbricos, Problema de Localización de Máxima Cobertura.

Abstract

Technological advances in recent years have allowed the development of small devices capable of measuring environmental conditions, the so-called wireless sensor networks, which have a wide variety of applications in different fields. Currently in the region of Jalisco, Mexico, the incidence of forest fires has increased to the point of representing a risk to the environment and the inhabitants of the region. Due to this, a project is being carried out in the La Primavera Forest to implement an early detection system integrating a network of wireless sensors with drones. In order to minimize the time to detection, this project focuses on designing an optimization model to define the location of a wireless sensor network; what is known in optimization as the Maximum Coverage Location Problem. For this, an analysis of the current conditions was carried out, in which the average detection time, average percentage of burned forest area, cost of the fire detection system and time of execution of the study were evaluated. The present project proposes a stochastic optimization model as a solution. For the validation of the model, randomized experiments and statistical studies were carried out that verify that the model complies with the restrictions and proposed goals. By improving the average detection time by 43.48%, the average percentage of burned areas by 43.30% and the implementation costs by 22.35%, likewise, the execution time was reduced to only 6, 63 seconds on average.

Keywords: Early fire detection system, Wireless Sensor Network, Maximum Coverage Location Problem.

Tabla de Contenido

I.	PROJECT CHARTER	4
II.	DEFINIR	8
A.	Contexto y Justificación.....	8
B.	Grupos de interés	10

C.	Requerimientos	13
III.	MEDIR	17
A.	Plan de recolección de datos	17
B.	Exploración del mercado	18
IV.	ANALIZAR.....	25
A.	Análisis de Oportunidad.....	25
B.	Revisión de literatura	27
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa.....	30
D.	Objetivos	33
E.	Plan de trabajo (PdT)	33
V.	MEJORAR	35
A.	Modelo matemático propuesto	35
B.	Validación del diseño propuesto	36
VI.	VERIFICAR.....	43
A.	Medición de los impactos.....	43
B.	Estandarización de la solución	47
C.	Conclusiones	48
D.	Recomendaciones.....	48
VII.	GLOSARIO.....	49
VI.	REFERENCIAS.....	50

Índice de Tablas

TABLA I.	ESCALA DE INFLUENCIA E INTERÉS	12
TABLA II.	CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE INTERÉS.....	12
TABLA III.	REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS	13
TABLA IV.	INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR.....	18
TABLA V.	RESUMEN COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES	22
TABLA VI.	RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO	23
TABLA VII.	ANÁLISIS DOFA.....	23
TABLA VIII.	MATRIZ DE COMPARACION POR PARES (CRITERIOS)	31
TABLA IX.	MATRIZ DE COMPARACION POR PARES (FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN).....	31
TABLA X.	MATRIZ DE COMPARACION POR PARES (TIEMPO DE EJECUCIÓN).....	31
TABLA XI.	MATRIZ DE COMPARACION POR PARES (COSTOS).....	32
TABLA XII.	MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (CALIDAD DE LA SOLUCIÓN).....	32
TABLA XIII.	VECTOR RESULTADO.....	32
TABLA XIV.	PLAN DE TRABAJO.....	33
TABLA XV.	RESUMEN DE RESULTADOS	39
TABLA XVI.	RESUMEN RESULTADOS	39
TABLA XVII.	COSTO POR NÚMERO DE SENSORES.....	40
TABLA XVIII.	VARIACIÓN DE INDICADORES	42
TABLA XIX.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	43
TABLA XX.	RESUMEN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	43

TABLA XXI. COMPARACIÓN DE COSTOS	44
TABLA XXII. CÁLCULO DEL ROI.....	44
TABLA XXIII. FACTORES DE EMISIÓN	45
TABLA XXIV. PORCENTAJES DE CONSUMO DE BIOMASA POR CLASE DE SEVERIDAD Y TIPO DE VEGETACIÓN	45
TABLA XXVI. ÍNDICE DE POTENCIAL DEL CALENTAMIENTO GLOBAL	46
TABLA XXVII. TABLA DE ANEXOS.....	53

Índice de Figuras

Fig. 1. Ubicación geográfica del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP)	9
Fig. 2. Áreas incendiadas durante el período de 1998 - 2012 en APFFLP	9
Fig. 3. Diagrama de cebolla con grupos de interés.	11
Fig. 4. Matriz Impacto vs. Influencia de los interesados.	13
Fig. 5. Diagrama obtención de los requerimientos	13
Fig. 6. Plot de cuadrícula iniciando detección.	18
Fig. 7. Plot de cuadrícula detectando incendios	19
Fig. 8. Plot de cuadrícula detección casi completa.	19
Fig. 9. Resumen estadístico indicador % de área forestal quemada hasta detección.....	20
Fig. 10. Resumen estadístico variable tiempo hasta detección.	20
Fig. 11. Gráfico de correlación entre tiempo hasta detección y área quemada hasta detección.	21
Fig. 12. Número de dispositivos requeridos por área a cubrir	22
Fig. 13. Árbol de problemas.....	25
Fig. 14. Diagrama árbol crítico de la calidad	26
Fig. 15. Matriz de co-ocurrencias	27
Fig. 16. Mapa de bits de la imagen del área.....	36
Fig. 17. Mapa de calor de la trayectoria del incendio.	37
Fig. 18. Impresión del resultado del modelo de optimización.	37
Fig. 19. Diagrama de flujo del modelo de optimización.....	38
Fig. 20. Resultados prueba de dos varianzas para tiempo de detección	40
Fig. 21 Resultados prueba de equivalencia de dos muestras para tiempo de detección	41
Fig. 22. Diagrama de cajas de prueba de equivalencia para tiempo de detección	41
Fig. 23. Resultados de prueba de dos varianzas para porcentaje de área forestal quemada hasta detección.....	41
Fig. 24. Resultados de prueba de equivalencia para porcentaje de área forestal quemada hasta detección.	42
Fig. 25. Diagrama de cajas de prueba de equivalencia 26para porcentaje de área forestal quemada hasta detección	42
Fig. 27. Gráfico resumen de los costos de implementación.....	44
Fig. 28. Gráfico de comparación de emisiones de CO ₂	46
Fig. 29. Gráfico de comparación de CO ₂ equivalente de las emisiones de metano.....	47
Fig. 30. Gráfico de comparación de CO ₂ equivalente de las emisiones de óxido nitroso	47

I. PROJECT CHARTER

Descripción (<i>Business case</i>)	Planteamiento del problema(<i>Problem statement</i>)		
Actualmente en la región de Jalisco, México, la incidencia de incendios forestales ha aumentado hasta el punto de representar un riesgo para el medio ambiente y las personas de la región. Debido a esto, en el Bosque La Primavera se adelanta un proyecto para implementar un sistema de detección temprana que integra sensores inalámbricos y drones.	El equipo investigador a cargo de la implementación de esta tecnología presenta dificultades con la asignación de la ubicación de la red de sensores, altos tiempos de ejecución y además requieren que el sistema sea de bajo costo. Por esto, se identifica la oportunidad de diseño de un modelo de ubicación para los sensores.		
Impacto de los actores (<i>stakeholder's business needs</i>)	Restricciones	Especificaciones	Marco legal
Equipo de Investigación	Limitación de información disponible como cobertura actual, tiempos actuales. Limitación energética de los sensores y el dron. Número de sensores. Topografía y geografía del área. Software.	Mediante el uso de modelos de localización se busca garantizar una mejor localización de los sensores para el mayor cubrimiento del bosque.	
Equipo Candela	Tiempo de permanencia del equipo candela en el proyecto. Lenguajes de programación. Software.	Mediante las capacidades y habilidades de los integrantes del equipo, se realizará el desarrollo del proyecto, con el fin de los mejores resultados. Dichas habilidades serán expuestas a una formación continua, donde el equipo adquirirá nuevas competencias.	
Población de Guadalajara y alrededores	Restricciones matemáticas del modelo.	Diseñar una alternativa para la localización de los sensores minimizando las consecuencias de un incendio no detectado tempranamente.	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera en el estado mexicano (Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988-Última reforma publicada DOF 04-06-2012). [11]
Bomberos de Zapopan	Factores que limiten el reporte en tiempo real del estado del incendio. Como pueden ser la interferencia en la transmisión de los datos por factores meteorológicos o limitaciones energéticas de los sensores y drones.	Proveer de una red integrada de información, que permita la rápida toma de decisiones para el combate de incendios.	Reglamento Interior de Trabajo del Heroico Cuerpo de Bomberos. [13]
SEMADET	Cumplimiento	Brindar una	Decreto

	con los estándares y necesidades de un sistema de detección efectiva.	alternativa de localización que permita la detección oportuna de los incendios, mitigando de esta manera la pérdida del capital natural del bosque.	NÚMERO 24450/LX/13. Gobernación de Jalisco. Ley de transparencia y acceso a la información pública del estado de Jalisco y sus municipios.[15]	
Gobierno de Jalisco	Cuantificar el riesgo que representa un nuevo incendio en un punto específico, su magnitud y su posible afectación a la comunidad.	Proveer de una red integrada de información, que permita la toma de decisiones en cuanto a clasificación del incendio y sus posibles afectaciones. Monitoreo preventivo de zonas de mayor probabilidad en ocurrir un incendio.		
CONAFOR	Cuantificar el estado real, de las zonas forestales y de reserva natural, que están bajo su directriz.	Brindar informes del comportamiento de incendios forestales que se presenten, generando así información que ayude a predecir el comportamiento de estos.	Reglas de Operación Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021. (El día 30 de diciembre de 2020 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación.)[18]	
COECYTJAL	Generación de interés por proyectos de detección de incendios, por medio de resultados positivos en cuanto a efectividad.	Cumplir con los lineamientos estipulados por la entidad. Generar los reportes adecuados para la interpretación y aplicación de los estudios. Declarar los resultados verdaderos arrojados por los estudios. Protección de propiedad intelectual.	Decreto NÚMERO 24450/LX/13. Gobernación de Jalisco. Ley de transparencia y acceso a la información pública del estado de Jalisco y sus municipios.[15]	
SEMARNAT	Cubrimiento total de las zonas. Cuantificación real de la totalidad de las afectaciones.	Generación de reportes de datos del comportamiento de incendios previos que lograron ser monitoreados y estudiados.	Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública. (Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 de mayo de 2016. Última reforma publicada DOF 27-01-2017).[21]	
Indicadores de desempeño (KPI's)				
Variable	Actualidad		Meta	
Tiempo hasta detección de incendio	2,8641	Épocas	1,43205	Épocas
Área forestal quemada	46,873	%	23,4365	%
Costo de implementación	548 363,75	USD	≤ 548 363,75	USD
Tiempo de ejecución del estudio	600	minutos	60	Minutos.

Objetivo General (<i>Goal statement</i>)
<i>Diseñar un modelo de optimización para definir la localización de una red de sensores inalámbricos minimizando el tiempo hasta detección.</i>
Objetivos específicos (<i>Project scope</i>)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar en la literatura modelos para la localización óptima en redes de sensores inalámbricos que puedan adaptarse para minimizar el tiempo hasta detección. 2. Adaptar el modelo de optimización para que considere la periodicidad de incendio del área del problema. 3. Desarrollar el código en el lenguaje seleccionado para generar escenarios aleatorios, extraer los datos paramétricos y ejecutar el modelo. 4. Validar la propuesta por medio de simulación comparándola con otros escenarios. Esto con el fin de verificar si se reducen los indicadores tiempo de detección, costos y área forestal quemada.

Plan de trabajo (<i>Project Plan</i>)				Equipo de trabajo (<i>Team Members</i>)	
Actividad	Fecha inicio	Fecha fin	Área IISE	Nombre	Rol
1.1 Estructuración de ecuaciones de búsqueda.	23/08/2021	31/08/2021		Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>
1.2 Revisión detallada de artículos.	23/08/2021	31/08/2021		Nataly Rojas Daza	<i>Standard setter</i>
1.3 Selección de modelos.	01/09/2021	09/09/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>
1.4 Selección de métricas.	01/09/2021	09/09/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>
2.1 Selección de variables de decisión del modelo.	10/09/2021	15/09/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Juan Esteban López David	<i>Observer/commentator</i>
2.2 Identificación de la información de entrada relevante para el diseño del modelo	10/09/2021	15/09/2021		Nataly Rojas Daza Juan José Osorio Navia	<i>Standard setter</i> <i>Harmonizer</i>
2.3 Formulación matemática del modelo de optimización	16/09/2021	21/09/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Nataly Rojas Daza Felipe Domínguez Herrera	<i>Standard setter</i> <i>Gatekeeper</i>
3.1 Selección de lenguaje de programación	02/08/2021	02/08/2021		Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>
3.2 Capacitación en lenguaje de programación	03/08/2021	23/08/2021		Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>
3.3 Implementación computacional de los modelos	24/08/2021	01/09/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Felipe Domínguez Herrera Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Standard setter</i>
3.4 Verificación de resultados y corrección de errores	02/09/2021	10/09/2021	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper</i> <i>Observer/commentator</i> <i>Harmonizer</i> <i>Standard setter</i>

4.1 Diseño de experimentos para evaluar los métodos de optimización.	22/09/2021	30/09/2021	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	Nataly Rojas Daza Juan Esteban López David	<i>Standard setter Observer/comment ator</i>
4.2 Implementación computacional de las simulaciones	01/10/2021	11/10/2021	<i>Operations Research and Analysis</i>	Nataly Rojas Daza Felipe Domínguez Herrera	<i>Standard setter Gatekeeper</i>
4.3 Evaluación de los indicadores de desempeño	12/10/2021	25/10/2021	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	Felipe Domínguez Herrera Juan Esteban López David Juan José Osorio Navia Nataly Rojas Daza	<i>Gatekeeper Observer/comment ator Harmonizer Standard setter</i>

II.DEFINIR

A. Contexto y Justificación

En las últimas décadas, se ha observado una tendencia de aumento, paulatino y constante, de la temperatura promedio de la tierra. Este fenómeno, que se conoce como calentamiento global, se atribuye al incremento de la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera, causado por la utilización de combustibles fósiles, la deforestación y demás acciones del hombre que alteran los ciclos naturales de la tierra [1]. Actualmente, la temperatura promedio del planeta se encuentra cerca de 1,2°C por encima de la temperatura promedio registrada en la época preindustrial; si esta tendencia continúa, se estima que para el año 2034, la temperatura global se ubique 0,3°C por encima de la temperatura promedio actual [2].

El calentamiento global y los incendios forestales hacen parte de un círculo vicioso, pues cuando se presentan altas temperaturas, y periodos secos, se facilita la ocurrencia y propagación de los incendios forestales. A la vez, los incendios forestales producen gases de efecto invernadero e implican pérdida de la biomasa que ayuda a regular las temperaturas globales [3]. Aproximadamente el 31% del dióxido de carbono que se encuentra en los bosques está concentrado en la biomasa que los compone, mientras que el 69% restante está atrapado bajo el suelo; cuando el bosque se incendia por un tiempo muy prolongado, el fuego, además de liberar el dióxido de carbono que compone la biomasa del bosque, libera también, el atrapado en el subsuelo, lo cual lleva a que las consecuencias del incendio sean aún más severas [4]. Cuando los bosques vuelven a crecer después de ser quemados, son más pequeños y secos que antes, de modo que su capacidad de almacenamiento de dióxido de carbono se ve reducida [5].

Al igual que en muchas zonas del mundo, Jalisco, México, enfrenta una fuerte problemática con respecto a los incendios forestales. Especialmente en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP), más conocido como Bosque La Primavera, ubicado contiguo a la ciudad de Zapopan y Guadalajara (Fig. 1). En los últimos 20 años, se ha presentado una elevada tasa de incendios forestales, que fluctúa entre 0 a 60 incidentes por año [6]. De hecho, cerca del 90% de la superficie del APFFLP, se ha incendiado al menos en una ocasión (Fig. 2). Dichos incendios tienen como consecuencia, lesiones y muerte de personas y fauna, contaminación ambiental, pérdida de masa forestal; pérdidas económicas y afectaciones en la salud de los habitantes y en general, la destrucción continua de los bosques. Se tienen datos registrados que indican que durante el período de 1998 a 2012 la tasa de pérdida de masa forestal fue de 1,31%, que corresponde a 92,347 hectáreas por cada año [6]. La cercanía a las ciudades suele incrementar la presencia de incendios, muy probablemente como consecuencia de acciones intencionadas o no de los visitantes a estas reservas naturales.

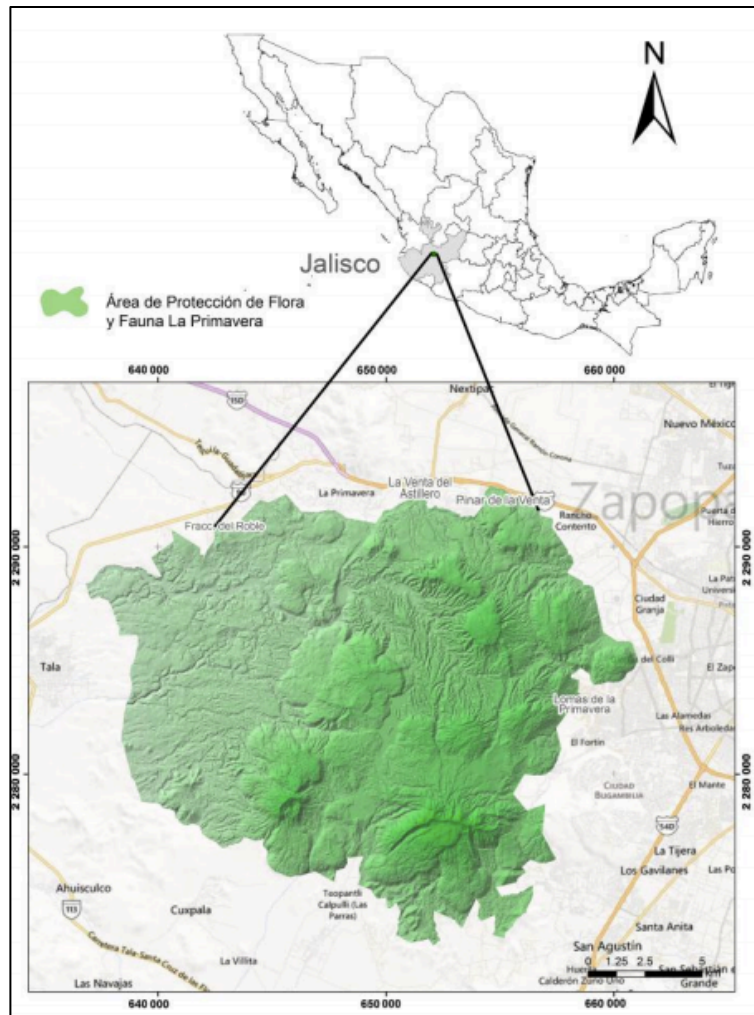


Fig. 1. Ubicación geográfica del Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP) [6].

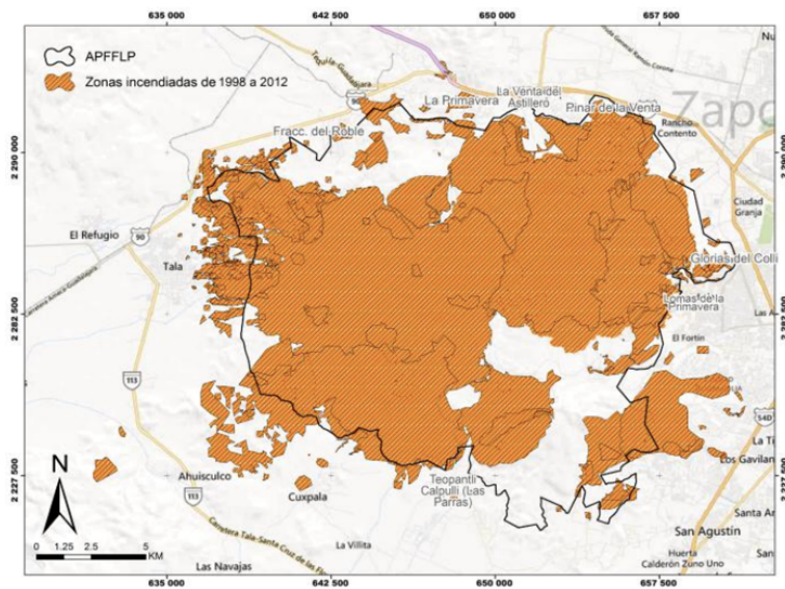


Fig. 2. Áreas incendiadas durante el período de 1998 - 2012 en APFFLP [6].

Teniendo en cuenta la emergencia ocasionada por el calentamiento global, atender de manera rápida y eficaz los incendios forestales es una prioridad. Una de las herramientas que se proponen actualmente para mitigar el daño causado por los incendios, son

los sistemas de detección temprana. Estos funcionan como una alarma que identifica el posible foco de un incendio en cualquier parte del ecosistema, permitiendo así la rápida acción de las entidades responsables de contener y apagar el fuego. Con esta herramienta se evita la quema de grandes extensiones naturales que tardan mucho tiempo en recuperarse [7]. Actualmente, en el Estado de Jalisco y en el APFFLP, se emplea una red de vigilancia comprendida por cámaras robotizadas, torres de observación y brigadas móviles que se desplazan por las áreas forestales en automóvil y helicóptero. El problema es que estos sistemas son costosos, las cámaras instaladas en 2018 tuvieron un costo de 18 millones de pesos mexicanos, aproximadamente 900 000 dólares, y para que las brigadas sean efectivas se debe tener un constante flujo de vehículos por la zona. Además, las cámaras tardan 15 minutos en rotar 360 grados y pueden presentar falsas alarmas [8].

En respuesta a esta problemática se adelantan proyectos, dentro de los cuales se enmarca este proyecto de diseño, que buscan mejorar las condiciones de detección de focos de fuego en el Bosque La Primavera. Una iniciativa de investigadores asociados a la Universidad Autónoma de Guadalajara junto con integrantes de otras Universidades e institutos busca precisamente desarrollar un sistema inteligente de detección temprana de incendios forestales de bajo costo. El sistema se basa en tecnología basada en el internet de las cosas; básicamente consiste en una red de sensores isotrópicos de bajo consumo energético, encargados de enviar una primera alerta a una estación de información central al detectar señales que sugieran la presencia de fuego en una zona. Posteriormente, se contará con la presencia de un dron que, activado por la primera alarma del sensor, se dirige al lugar de la sospecha de incendio y se encarga de confirmar la sospecha. El dron estará equipado con una cámara térmica, que funcionará a la par de algoritmos de inteligencia artificial para que mediante el análisis de imágenes pueda identificar el posible incendio. En el posible caso de ser confirmada la sospecha de fuego por el dron, se generará una alarma, reportando la ubicación y el área afectada. De igual manera, el sistema de inteligencia artificial controlará la trayectoria del dron, evadiendo obstáculos y demás adversidades. Toda la información captada y emitida por los sensores junto con el dron, será enviada a un centro de monitoreo al igual que a un aplicativo móvil disponible en los celulares de los brigadistas encargados. Este sistema funcionaría las 24 horas del día, los 7 días de la semana a lo largo del año, permitiendo la detección temprana de incendios forestales, evitando una posible propagación y disminuyendo las consecuencias de este.

Actualmente, el grupo de estudio encargado del diseño del sistema de detección temprana no ha adelantado un método específico para la localización óptima planeada de la red sensores sobre el área de interés APFFLP. De hecho, han reportado elevados tiempos de simulación en las pruebas que han ejecutado. Es por esto por lo que se presenta la oportunidad de diseñar un modelo para la optimización de la localización de los sensores, para garantizar la cobertura apropiada de la zona, con el fin de que esta se encuentre completamente dentro del rango captado por los sensores y puedan tener conexión con el centro de monitoreo y control. En optimización, esto se conoce como *Problema de Localización de Máxima Cobertura*, el cual tiene varias extensiones dependiendo del objetivo y características del modelo. Para el desarrollo de estos métodos de optimización es necesario tener en cuenta la geografía, la topografía y el registro histórico de incendios del APFFLP; además de supuestos y otros datos que se abstraigan de los reales. Además, se diseñarán estrategias para la validación de las diferentes configuraciones de la red, particularmente para determinar la fiabilidad del sistema, el consumo de energía, la capacidad de detección, entre otros aspectos. Esta alternativa generará un uso eficiente de los recursos que posee actualmente el grupo de investigación.

Los beneficios potenciales de abordar este proyecto se fundamentan en aprovechar la oportunidad de la situación que se presenta en el Bosque, brindar una alternativa óptima diseñada a partir de herramientas de la ingeniería industrial como optimización y simulación, constituye un aporte importante y fructuoso para el proyecto en curso en México. Por otro lado, se contribuye a lograr el objetivo del equipo de investigación de crear un sistema de bajo costo y más efectivo en detectar incendios.

Por último, cabe destacar que, teniendo en cuenta los requerimientos correspondientes, el desarrollo de este proyecto podría servir de referente para una posible replicación de la solución para la localización de sensores de detección temprana en otras áreas de México y potencialmente en Colombia, puesto que, otros países presentan la misma necesidad de aplacar la incidencia de los incendios forestales.

B. Grupos de interés

Los grupos de interés son cualquier grupo o individuo que pueda afectar o ser afectado por los objetivos del proyecto, ya sea de forma positiva o negativa [9]. En este sentido, se procedió a identificar los individuos, entidades y grupos de interés. Además de esto,

también se clasificaron con la herramienta de diagrama de cebolla (Fig. 3), que consiste en graficar los grupos en capas que se expanden, para describir gráficamente si son grupos internos o externos

Fig. 3. Diagrama de cebolla con grupos de interés.



Teniendo en cuenta, las especificaciones y los objetivos del proyecto de diseño, se determinó que el grupo de interés de relación más directa es el equipo de investigación, y el equipo candela, quienes están a cargo de la realización del proyecto. El equipo de investigación está compuesto por cinco estudiantes de maestría en Ciencias Computacionales de la Universidad Autónoma de Guadalajara, cinco profesores investigadores de universidades en México, Colombia y España, incluyendo al director del presente proyecto, el Dr. Fabián Castaño, y la Dr. Lina María Aguilar, responsable técnica del proyecto en México. Cabe destacar que el equipo colabora en conjunto con el Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico (CERTEC) de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Tecnológico de Monterrey y el Instituto Politécnico Nacional, ambos de México.

Continuando, en la capa dos del diagrama que representa a los actores o usuarios que se ven impactados por la solución presentada, se incluyó al Cuerpo de Brigadistas Bomberos de Zapopan, que son los encargados de socorrer y combatir los incendios en el Bosque; a la población de Guadalajara y sus alrededores en el Estado de Jalisco, debido a que, los efectos de los incendios incluyen la “reducción de las funciones que cumplen las áreas comprometidas (producción, protección o recreación)” [6] y más importante porque, “el Bosque La primavera constituye un “pulmón” natural para la Zona Metropolitana de Guadalajara” [6]; finalmente el Organismo Público Descentralizado, directamente implicado con la situación problema, es la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET), la cual, en pocas palabras, tiene como objetivo resolver los problemas ambientales del Estado de Jalisco, implementando políticas públicas de ordenamiento territorial, desarrollo urbano y de conservación; es decir, a parte de tener influencia en el resultado del proyecto y proporcionar conocimiento útil, tiene influencia normativa legal.

En la capa más externa, se encuentran entidades gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México, que, para el contexto del proyecto, sirve de vigía y proporciona datos relevantes para el proyecto, puesto que ellos, registran la información sobre los incendios en México. Por otro lado, se encuentra la Comisión Nacional Forestal (Conafor), dependencia de la SEMARNAT, que tiene como objetivo el apoyo, promoción, conservación y restauración de los bosques de México. Seguido, se encuentra el Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Jalisco (COECYTJAL) que promueve el desarrollo científico y financia económicamente el proyecto. Por último, se tiene al gobierno de Jalisco como actor de interés externo, que se no es impactado directamente, pero tiene en interés en que se resuelvan los problemas ambientales.

Adicionalmente, con el soporte de una hoja de clasificación (ANEXO 1), y la escala dependiente del rol de cada parte interesada a partir de una escala (TABLA I), se construyó una tabla de clasificación con la influencia e interés de cada parte (TABLA II) para detallar de una forma más clara, cómo se relacionan los grupos de interés con el proyecto. El resultado se encuentra en la gráfica de Impacto vs. Influencia (Fig. 4).

TABLA I.
ESCALA DE INFLUENCIA E INTERÉS

ESCALA	
1	Muy baja influencia o interés
2	Baja influencia o interés
3	Media influencia o interés
4	Alta influencia o interés
5	Muy alta influencia o interés

TABLA II.
CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

Como se puede observar en la Fig. 4, el es el número 1, correspondiente al equipo de grupo con mayor importancia, ya que ellos

grupo de interés de mayor impacto e influencia investigación, ciertamente, este debe ser el requieren de los resultados del proyecto y los

No.	Grupo de interés	Descripción	Efecto (del proyecto en interesado)	Influencia	Interés
1	Equipo de Investigación	Desarrollan las otras etapas de la investigación en México y España	Principal y directamente afectados por los resultados, ya que requieren de la solución del proyecto	4	5
2	Equipo Candela	Grupo de estudiantes que realizan el proyecto y diseñarán la alternativa	Se interesan por aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera, ampliar las habilidades de programación y, por último, brindar una alternativa factible para su aplicación en México.	3	5
3	Población de Guadalajara y alrededores	Afectados por los incendios	Con el proyecto en México, completado exitosamente, se disminuiría el tiempo de respuesta ante un incendio, disminuyendo su magnitud y efectos	0	3
4	Bomberos de Zapopan	Junto con personal del OPD del Bosque y personal de Conafor, combaten los incendios	Disminuirían los gastos y lesiones en combate, se atenderían más rápido los incidentes	0	2
5	SEMADET	Desarrollan planes para protección ambiental en Jalisco, definen cómo se protege el bosque	Beneficiarios del resultado, al reforzar las medidas de detección existentes que ellos ya implementaban	4	2
6	Gobierno de Jalisco y México	Proporciona los recursos a las entidades gubernamentales, define leyes y normativas	El sistema podría ser aplicable en otras áreas y regiones del país. Potencialmente en otros países como Colombia	1	1
7	Conafor	Reportan y combaten en incendios	Disminuirían los gastos y lesiones en combate, se atendería más rápido los incidentes	0	2
8	COECYTJAL	Financia el proyecto en México	Se interesa por el desarrollo tecnológico, el éxito del proyecto, y la cooperación entre instituciones de investigación	2	3
9	SEMARNAT	Recopila información sobre incendios en todo México	Se interesaría por implementar el sistema en otras áreas del país	1	1

objetivos se plantean de acuerdo con sus requerimientos y necesidades. Su ubicación en la matriz indica que debe ser administrado de cerca, para involucrarlo directamente con el desarrollo del proyecto. En segundo lugar, el grupo con mayor influencia e impacto es el equipo candela, puesto que, llevarán a cabo el proyecto, proporcionando conocimientos aprendidos a lo largo de la carrera, se interesa por desarrollar sus competencias en optimización y brindar una alternativa real aplicable a un proyecto de mayor escala. Por otro lado, la SEMADET se encuentra en un nivel bajo de impacto, pero de mayor influencia, puesto que ellos proporcionan la información sobre las medidas de detección existentes en el Bosque, y finalmente se interesarían por el sistema nuevo a proponer. Como muestra la matriz, su ubicación se encuentra en la zona de mantener informado, ya que no cuenta con mucho poder sobre el proyecto, pero sí interés. En cuanto al COECYTJAL y a la población de Guadalajara y sus alrededores, se tiene un nivel alto-medio de impacto, y bajo-medio de interés, ubicándose gráficamente en una zona que indica, que se debe mantener satisfecho, es decir, que se busca cumplir con las expectativas y objetivos del proyecto, puesto que, son la institución financiadora del mismo y parte de los directamente afectados, respectivamente. Finalmente, los grupos ubicados en la zona de monitoreo son los cuales, no se requiere mantener informados, pero sí puede ser monitoreada su actividad de interés para el equipo.

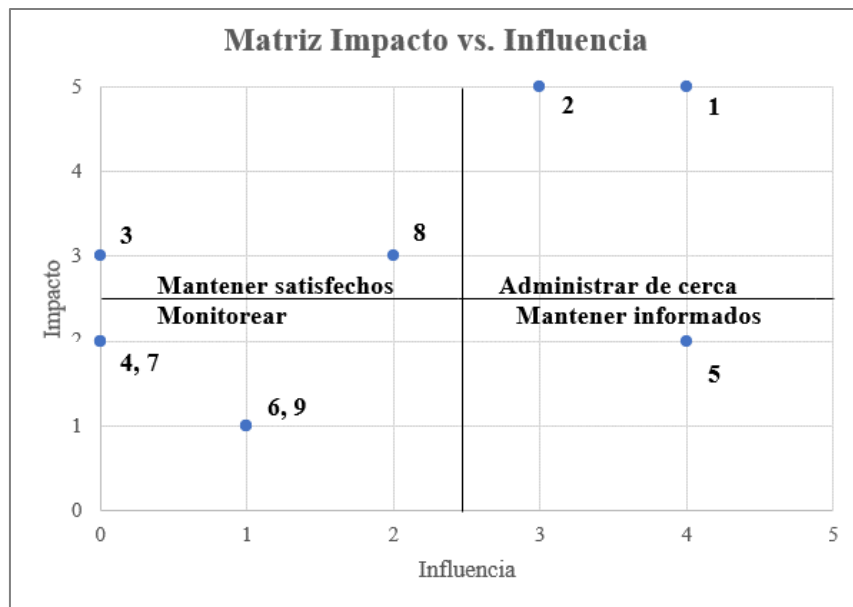


Fig. 4. Matriz Impacto vs. Influencia de los interesados.

C. Requerimientos

Con la identificación de los interesados, su posterior análisis y clasificación en la matriz Impacto vs. Influencia, se procede a investigar sus necesidades, expectativas, percepciones y experiencias. Dicha información será la precursora de los requerimientos de dichos grupos. La metodología aplicada se consignó en la Fig. 5.

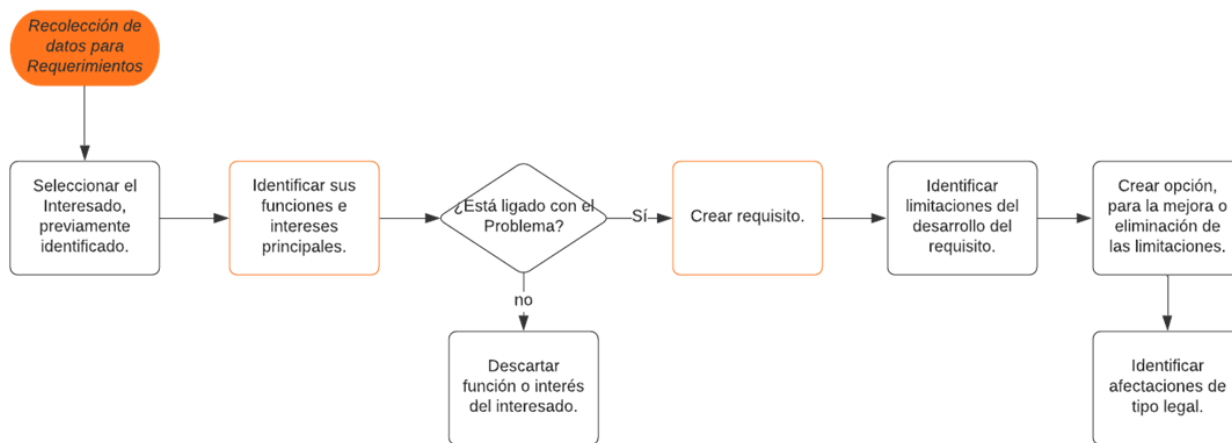


Fig. 5. Diagrama obtención de los requerimientos.

Posteriormente, se procede a exponer los requerimientos de los grupos de interés, en la TABLA III se recopilan los resultados de las restricciones, especificaciones y leyes, normas y estándares, que se esperan suplir para cada uno.

TABLA III.
REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

GRUPOS DE INTERÉS	VoC (REQUISITOS GRUPOS DE INTERÉS)	RESTRICCIONES DE DISEÑO	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES	
				Legislación y Requisitos Aplicables	Importancia o Efecto
Equipo de Investigación	Aumentar la cobertura de los sensores con una localización	Limitación de información disponible como cobertura actual,	Mediante el uso de modelos de localización se busca garantizar una mejor		

	<p>óptima.</p> <p>Disminuir los tiempos de detección de los incendios.</p> <p>Facilitar la evaluación de la localización de los sensores en escenarios probabilísticos.</p> <p>Cumplir con estándares de bajo costo.</p>	<p>tiempos actuales.</p> <p>Limitación energética de los sensores y el dron.</p> <p>Número de sensores.</p> <p>Topografía y geografía del área.</p> <p>Software.</p>	<p>localización de los sensores para el mayor cubrimiento del bosque.</p>		
Equipo Candela	<p>Desarrollar competencias en programación y simulación.</p> <p>Formación continua.</p> <p>Reconocimiento.</p>	<p>Tiempo de permanencia del equipo candela en el proyecto.</p> <p>Lenguajes de programación.</p> <p>Software.</p>	<p>Mediante las capacidades y habilidades de los integrantes del equipo, se realizará el desarrollo del proyecto, con el fin de los mejores resultados. Dichas habilidades serán expuestas a una formación continua, donde el equipo adquirirá nuevas competencias.</p>		
Población de Guadalajara y alrededores	<p>Minimizar la cantidad de dióxido de carbono liberado a la atmósfera por consecuencia de la magnitud y duración de los incendios [10].</p>	<p>Restricciones matemáticas del modelo.</p>	<p>Diseñar una alternativa para la localización de los sensores minimizando las consecuencias de un incendio no detectado tempranamente.</p>	<p>Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera en el estado mexicano (Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988-Última reforma publicada DOF 04-06-2012). [11]</p>	<p>Estipula los lineamientos básicos en manipulación e interferencia humana en espacios protegidos como reservas y zonas forestales.</p>
Bomberos de Zapopan	<p>Reporte oportuno de alertas de incendio.[12]</p>	<p>Factores que limiten el reporte en tiempo real del estado del incendio. Como pueden ser la interferencia en la transmisión de los datos por factores meteorológicos o limitaciones energéticas de los sensores y drones.</p>	<p>Proveer de una red integrada de información, que permita la rápida toma de decisiones para el combate de incendios.</p>	<p>Reglamento Interior de Trabajo del Heroico Cuerpo de Bomberos. [13]</p>	<p>Brinda información sobre la formación básica de los bomberos, lo cual es necesario para garantizar que el sistema de integrado de información pueda ser interpretados por ellos.</p>

SEMADET	<p>Lograr reducir la tendencia de la pérdida del capital natural, de la contaminación y contribuir a la mejora en la calidad de vida en cada una de las regiones del Estado.</p> <p>[14]</p>	Cumplimiento con los estándares y necesidades de un sistema de detección efectiva.	<p>Brindar una alternativa de localización que permita la detección oportuna de los incendios, mitigando de esta manera la pérdida del capital natural del bosque.</p>	<p>Decreto NÚMERO 24450/LX/13. Gobernación de Jalisco. Ley de transparencia y acceso a la información pública del estado de Jalisco y sus municipios.[15]</p>	<p>Garantiza el uso adecuado de los recursos contra el combate de incendios.</p> <p>Permitiendo la confianza en cuanto datos suministrados como costos y efectividad de los componentes.</p>
Gobierno de Jalisco	<p>Proveer una alternativa que permita para el 2021 obtener una reducción significativa en los incendios forestales, en comparación con años anteriores.</p> <p>[16]</p>	Cuantificar el riesgo que representa un nuevo incendio en un punto específico, su magnitud y su posible afectación a la comunidad.	<p>Proveer de una red integrada de información, que permita la toma de decisiones en cuanto a clasificación del incendio y sus posibles afectaciones.</p> <p>Monitoreo preventivo de zonas de mayor probabilidad en ocurrir un incendio.</p>		
CONAFOR	<p>Proporcionar una alternativa factible que permita la conservación de zonas forestales, de posibles afectaciones por incendios.[17]</p>	Cuantificar el estado real, de las zonas forestales y de reserva natural, que están bajo su directriz.	<p>Brindar informes del comportamiento de incendios forestales que se presenten, generando así información que ayude a predecir el comportamiento de estos.</p>	<p>Reglas de Operación Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021. (El día 30 de diciembre de 2020 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación.)[18]</p>	<p>Brinda recursos a involucrados en el desarrollo forestal, para tomar acción directa en esta.</p>
COECYTJAL	<p>Impulsar y fomentar el desarrollo del avance científico y tecnológico en Jalisco.[19]</p>	Generación de interés por proyectos de detección de incendios, por medio de resultados positivos en cuanto a efectividad.	<p>Cumplir con los lineamientos estipulados por la entidad.</p> <p>Generar los reportes adecuados para la interpretación y aplicación de los estudios.</p> <p>Declarar los resultados verdaderos arrojados por los estudios.</p> <p>Protección de propiedad intelectual.</p>	<p>Decreto NÚMERO 24450/LX/13. Gobernación de Jalisco. Ley de transparencia y acceso a la información pública del estado de Jalisco y sus municipios.[15]</p>	<p>Garantiza la transparencia en las ejecuciones del proyecto.</p> <p>Garantiza la protección de la propiedad intelectual.</p>

SEMARNAT	Prevenir futuras pérdidas del espacio de zonas forestales. [20]	Cubrimiento total de las zonas. Cuantificación real de la totalidad de las afectaciones.	Generación de reportes de datos del comportamiento de incendios previos que lograron ser monitoreados y estudiados.	Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública. (Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 de mayo de 2016. Última reforma publicada DOF 27-01-2017).[21]	Se exige la divulgación de la información, que nos garantiza el acceso a información relevante para el proyecto.
----------	---	---	---	--	--

III.MEDIR

A. Plan de recolección de datos

Se elaboró un plan de recolección de datos (ANEXO 3), este determina instrucciones y pautas para medir las variables seleccionadas y obtener los datos de forma completa y organizada. En primera instancia, para seleccionar las variables involucradas, se elaboró una revisión de los requisitos de los grupos de interés, de acuerdo con la importancia de cada uno y evaluando el alcance que se podría dar con el proyecto.

De acuerdo con los resultados de la clasificación de grupos de interés, el equipo de investigación se considera como el grupo clave para el proyecto. Según sus requerimientos, es necesario que se evalúen las condiciones de sistema de detección de incendios actual, por lo que se escogieron las siguientes variables que corresponden a cada requerimiento.

- Tiempo promedio de detección de incendio
- Área forestal quemada (hasta detección)
- Costo de implementación
- Tiempo de ejecución del estudio

El siguiente grupo de mayor influencia, es la SEMADET, seleccionado porque se enfocan en la protección del bosque La Primavera, lo que implica que velan por el buen rendimiento de los sistemas de detección. Es importante evaluar la cantidad de área forestal quemada hasta la detección del incendio, puesto que puede ser una consecuencia directa de una detección tardía asociada a equipos o mecanismos de detección inadecuados. Esta última variable está, a su vez directamente relacionada con el tiempo de detección, es otra variable de interés que se busca reducir con la implementación del nuevo sistema.

Debido a que el proyecto es desarrollado en México, por el equipo de investigación, el tiempo de ejecución del estudio proviene de recolección de información proporcionada por el nombrado equipo. Para la variable tiempo de ejecución del estudio, se considera el tiempo de procesamiento de la simulación de los sensores ubicados aleatoriamente en la reserva natural. El equipo expresa, que debido a *CupCarbon*, el software empleado, la simulación tarda en completarse 10 veces el tiempo simulado. Estos largos tiempos computacionales se explican parcialmente en que dicho software simula, además de los eventos a ser monitoreados, algunas características de la operación de los sensores de compleja imitación. Como consecuencia, los tiempos de cómputo son altos aún si lo que se requiere monitorear son parámetros no necesariamente asociados a los módulos de comunicación y energía de los dispositivos. Por otro lado, la variable costo de implementación de los sensores se propuso con el objetivo de medir al final del proyecto si hubo una disminución, sin embargo, no es posible medirla actualmente puesto que todavía no están ubicándose los sensores. Entonces se efectuará una revisión bibliográfica para recolectar información en otros casos y poder establecer un promedio referencial de un costo de implementación de sensores para la detección de incendios.

Por medio de una simulación con autómatas celulares aleatorizada (o simulación basada en agentes) se calcularán el resto las variables. En síntesis, para generar el análisis de las variables seleccionadas, se usará un modelo de simulación de Montecarlo, suficientemente general como para aplicarse posteriormente con otros parámetros. Se plantea un área estándar de 200x200 cuadrículas, lo suficientemente pequeña para que este modelo preliminar pueda ejecutarse rápidamente, e imitaría una porción de la superficie del bosque. Se ubicaron inicialmente 10 sensores con un radio de 25 cuadrículas, y cada cuadrícula representa una zona con probabilidad de incendiarse. Además, para imitar la presencia de la vegetación incendiabile, se asigna aleatoriamente la presencia, con una probabilidad de 60%, partiendo de un estimado de densidad de vegetación, este parámetro representa un punto crítico en algunos modelos de autómatas celulares en el cual la probabilidad de que el incendio se extienda a todas las zonas incendiables se acerque al 100%. Posteriormente se asigna un punto al azar donde podría iniciarse un incendio de forma espontánea, se hace para cada cuadrícula una revisión de sus vecinos, y por cada vecino a su alrededor, se realiza un experimento de Bernoulli con una probabilidad estándar de 0,3 de que, si hay incendio en la cuadrícula vecina, este se propague al punto. Si bien, esta probabilidad se puede calcular con una fórmula que incluya más parámetros que asemejen la realidad, se tomó un valor estándar para inicializar un modelo general. Para determinar cuánto tiempo pasa hasta la detección, se ubican los sensores al azar con un radio de 20 cuadrículas. Finalmente, se cuentan el número de pasos de la simulación hasta que el incendio se detecta por un sensor y se mide el área quemada hasta el momento de la detección. Estos pasos son el tiempo de detección, definido como épocas, una unidad de tiempo ficticia que hace referencia a pequeños intervalos de tiempo entre revisiones de las cámaras. A partir de las anteriores variables, se pueden definir

los indicadores de desempeño (*KPI's*) para cuantificar los resultados del proyecto y poder verificar el efecto de este sobre la oportunidad.

TABLA IV.
INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Tiempo de detección de incendio.	Evaluar los tiempos de detección entre réplicas de la simulación, para comparar cuánto se tarda esta medida no optimizada.	Tiempo que se demora el sistema en detectar un incendio. El valor será determinado por medio de simulación, partiendo de parámetros estandarizados. El tiempo está definido en épocas.	$\overline{Td} = \frac{\sum_{i=0}^n Td_i}{n}$ $i = \text{épocas } n = \text{número de réplicas}$ (1)
Área forestal quemada	Determinar la afectación generada en el bosque por demoras en la detección del incendio.	Estimar el área forestal que se quema hasta que se detecta el incendio. Estos datos se extraerán de la simulación.	$\% \overline{Aq} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\text{Área quemada}}{\text{Total área propensa a quemarse}}}{n} * 100$ (2)
Costo de implementación	Se requiere conocer el costo promedio de implementación de la red de sensores.	Se realizará una recopilación de datos y una cotización, con el fin de determinar un estimado para el costo de este tipo de instalaciones.	$\text{CostoSD} = \text{CostoUnitarioNodo} * \#\text{NodosSensores} + \text{CostoUnitarioNodoC} * \#\text{NodosC}$ (3)
Tiempo de ejecución del estudio	Dada la oportunidad de generar una alternativa óptima de localización de los sensores, se busca reducir el tiempo de ejecución de este estudio.	Esta variable es suministrada por el equipo de investigación, a partir de su experiencia de trabajo con el software CUPCarbon.	$\text{TiempoE} = 10 * \text{TiempoSimulado} * [\text{minutos}]$ (4)

B. Exploración del mercado

La evaluación preliminar a través de la simulación de Montecarlo permite generar resultados a partir de un modelo general, con la posibilidad de experimentar con más parámetros ajustables en el futuro. En la fig. 6 se muestra cuando inicia la detección, el área en color amarillo representa la vegetación, el área restante en color negro representa el área no inflamable. Luego, se empiezan a captar focos de incendios, en color rojo. En la Fig. 8 ya se observa cómo se va completando el área detectada con los focos de fuego distribuidos en el área.

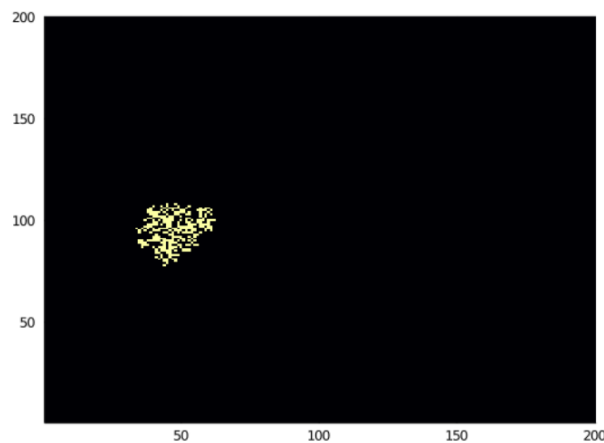


Fig. 6. Plot de cuadrícula iniciando detección.

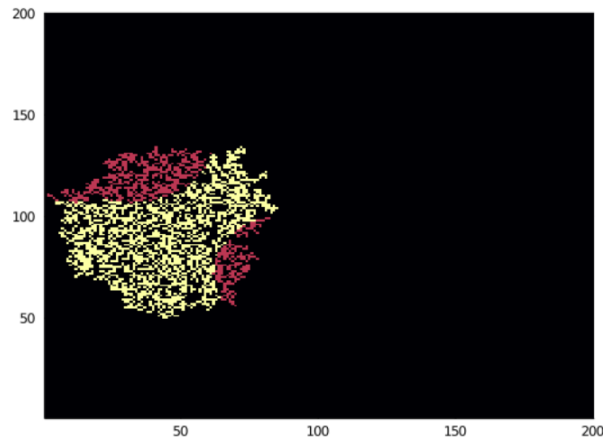


Fig. 7. Plot de cuadrícula detectando incendios

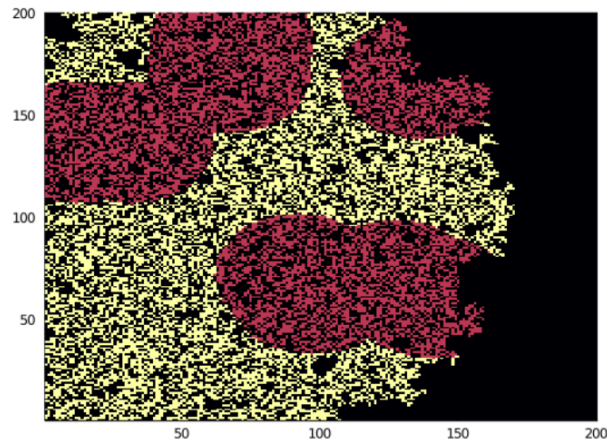


Fig. 8. Plot de cuadrícula detección casi completa.

Es pertinente aclarar que se enfocó en analizar la detección de incendios desde la cobertura de solo las cámaras y no desde el sistema completo, dado que las propuestas de mejora de la detección están siendo desarrolladas con base en la automatización, analizar el factor humano (torres de vigilancia, patrulleros, sobrevuelo) sería más complicado. El código completo del algoritmo se puede encontrar en el ANEXO 4.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de la medición de las variables previamente identificadas en la TABLA IV de acuerdo con el plan de recolección de datos planteado. Para las variables de tiempo de detección de incendio y área forestal quemada se llevó a cabo la simulación descrita anteriormente, de la cual se obtuvieron datos analizados a continuación (ANEXO 6).

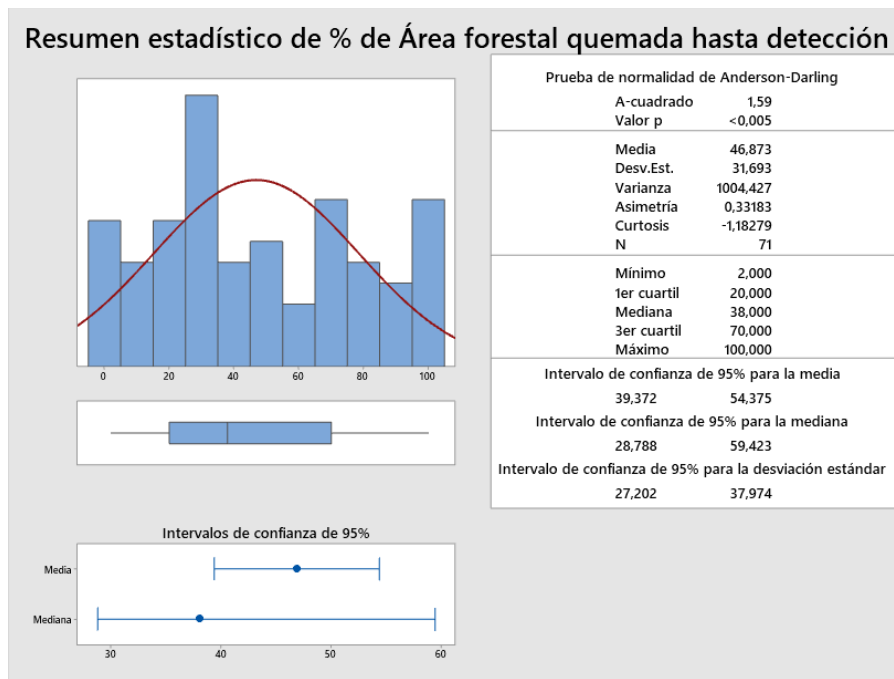


Fig. 9. Resumen estadístico indicador % de área forestal quemada hasta detección.

En cuanto a la variable de porcentaje de área forestal quemada hasta detección, se obtuvo como promedio de varias réplicas de la simulación, cuando se presenta un incendio en el bosque se quema el 46,873% del área propensa a quemarse. La mediana de los datos es 38% y el valor máximo es de 100%, lo que quiere decir que cuando se presente un incendio hay una probabilidad del 50% de que se queme entre el 38% y el 100% del área propensa a quemarse.

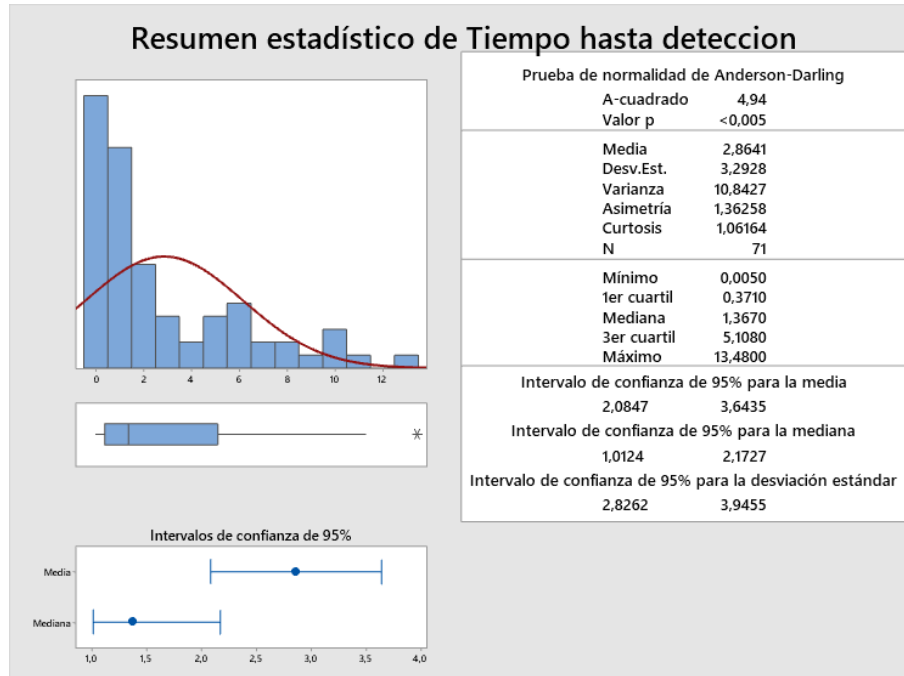


Fig. 10. Resumen estadístico variable tiempo hasta detección.

Referente al tiempo hasta detección, se tienen unidades ficticias de tiempo definidas como épocas que indican pequeños intervalos de tiempo entre revisiones de las cámaras, entre mayor es el número, más intervalos de tiempo se necesitó con la distribución aleatoria de los sensores para detectar el incendio en esa ocasión. Se tiene un promedio de 2,8641 épocas.

Para ambas variables se destaca que tienen una desviación estándar alta con relación al promedio, para el tiempo hasta detección es incluso mayor. Esto se debe a que en cada escenario de incendio simulado se ubican los sensores aleatoriamente en el área que imita la superficie del bosque, arrojando resultados muy variados. Esto se hace con el fin de que posteriormente se puedan comparar estos resultados con los que arrojen modelos donde se ubiquen los sensores de acuerdo con un previo diseño de la localización. Una vez se propongan mejoras, se utilizarán las mismas configuraciones para evaluar el escenario actual y el mejorado con el fin de determinar los beneficios generados como resultado del proyecto.

Como las dos variables son extraídas del mismo experimento de simulación, se comprobó la correlación que puede existir entre ambas. En este caso se tuvo en cuenta el coeficiente de correlación de Spearman pues se utiliza para comprobar tendencias de aumento o disminución, no necesariamente lineales como se logra utilizando el coeficiente de Pearson.

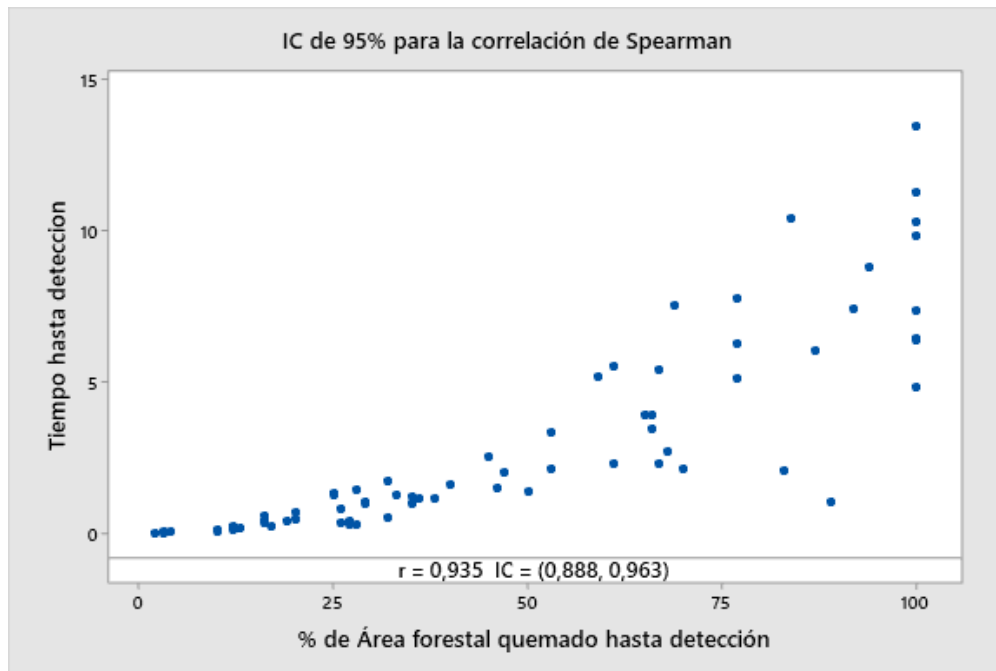


Fig. 11. Gráfico de correlación entre tiempo hasta detección y área quemada hasta detección.

El coeficiente de correlación es de 0,935, esto indica una relación positiva entre las variables, lo que quiere decir que si una de ellas aumenta la otra también lo hará, no necesariamente en la misma proporción. Esto tiene sentido, pues si aumenta el tiempo hasta la detección del incendio, también incrementará el tiempo de respuesta de los encargados de contener y apagar el fuego, como consecuencia teniendo un área quemada mayor.

La siguiente variable, costo de implementación, se estimó a partir de un estudio existente, en el que instalan un sistema similar de detección temprana de incendios de bajo costo [22]. Los precios de cada componente fueron cotizados en diferentes páginas de venta, seleccionando el mayor precio como referente. Por otra parte, la cantidad de sensores se estimó a partir de referentes en la literatura (Fig. 12), basados en que la cantidad de área y la densidad vegetal es similar. El área del Bosque La Primavera es de aproximadamente 200 km², tomando en cuenta una densidad vegetativa del 60% del área total, se obtiene un aproximado de 5500 nodos sensores. Se propone una cantidad de nodos centrales de ¼ de los nodos sensores. Esta variable representa un estimado inicial para los costos de hardware de los sensores, sin incluir los drones ni demás equipo necesario (TABLA V).

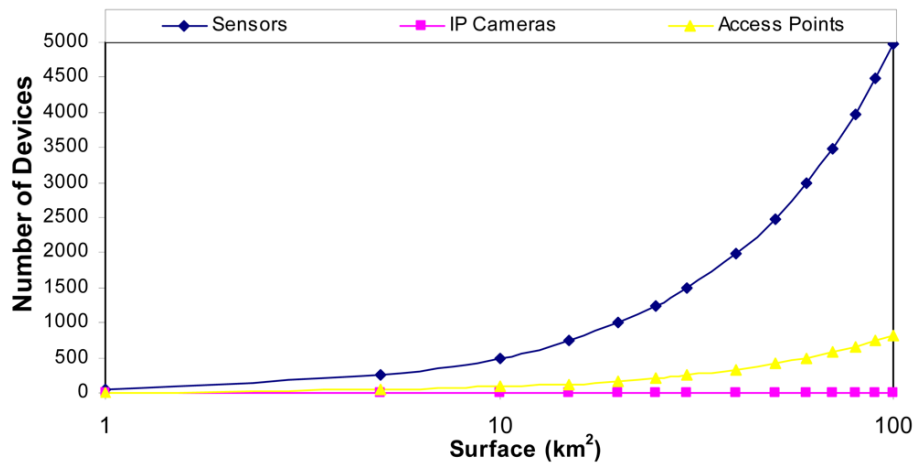


Fig. 12. Número de dispositivos requeridos por área a cubrir [23].

TABLA V.
RESUMEN COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES

Parte	Concepto Hardware	Referencia	Fuente	Precio unidad USD*	Cantidad*	Precio total USD
Nodo sensor	Sensor digital temperatura	<i>Sensirion</i> SHT75	[24]	USD 38,62	5500	USD 212 410
	Unidad de procesamiento	Texas Microcontrolador MSP430	[25]	USD 11,94	5500	USD 65 670
	Módulo transceptor	Texas Transceptor CC1101	[26]	USD 4,89	5500	USD 26 895
	Fuente de poder	Batería de litio 600mA	[27]	USD 7,95	5500	USD 43 725
Nodo central	Unidad de procesamiento	Microcontrolador PIC24FJ256GB110	[28]	USD 5,03	1375	USD 6916,25
	Módulo transceptor	<i>Laird Tech.</i> Transceptor AC4868-250	[29]	USD 110,18	1375	USD 151 497,5
	Fuente de poder	Panel solar pequeño genérico	[30]	USD 30,00	1375	USD 41 250
Total					USD	548 363,75

Por último, la variable de tiempo de ejecución del estudio determinada por la experiencia del equipo investigador mediante el trabajo realizado en el software *CUPCarbon*, señala el elevado valor de 600 minutos para procesar solo una hora de simulación, concluyendo de esta manera que cualquier simulación tomará 10 veces su tiempo real. Por consiguiente, es pertinente señalar una dificultad y limitante que posee el Equipo de Investigación a la hora de simular sus posibles modelos de ubicación de los sensores, teniendo en cuenta que estos modelos han sido diseñados con ubicaciones aleatorias o empíricos, que no aseguran ser eficientes.

Posterior al resumen de los datos, se elaboró un diagrama de flujo (ANEXO 6) que describe la situación actual del sistema. Este presenta los procesos que se llevan a cabo durante la revisión periódica de las señales de detección de incendios. Las señales tomadas por el instrumento MODIS, capturan variables como el NDVI (Índice de anomalía de la vegetación), el cual mide la cantidad de vegetación que se encuentra en área y se compara con datos tomados en el pasado [31]. Además, se usa la variación de temperatura sobre la superficie terráquea en el área determinada, en caso de percibirse una diferencia se activa el sistema de alerta [8].

También se cuenta con una red de detección de 24 horas, con torres de observación ubicadas en las altas cumbres de la zona protegida. Brigadas móviles las cuales dan rondas por toda el área en busca de fuego o humo a la vista, igualmente hay presencia de una brigada aérea la cual supervisa desde los cielos que no exista presencia de humo ni de fuego, ya que es determinante para poder contener y apagar el fuego tempranamente [8][31]. Se cuenta con un sistema de cámaras 360 grados y cámaras con sensores infrarrojos [32]. Son ubicadas en altas torres que permiten visibilizar el humo y fuego, estas cámaras son controladas por operadores desde un puesto de control remoto. En caso de presentarse alguna señal de alarma, se envían a las brigadas móviles para examinar el caso y que no se trate de una quema agrícola o fogata [8]. El último medio es algún reporte o denuncia de algún ciudadano que transite por la zona y haya visualizado el fuego o humo en la zona. En caso de llamado de emergencia se envían las brigadas móviles

a examinar el caso [8]. La entidad encargada de despachar las patrullas, helicópteros y equipo contra incendio en caso de que se presente algún evento es el CONAF (Consejo Nacional Forestal) [32].

Se tendrán en cuenta las variables obtenidas para determinar si los indicadores del sistema mejoran, cuando se pruebe la localización óptima de los sensores en el sistema simulado. Basada en la experiencia del grupo de investigación, se propone para las variables de tiempo hasta detección del incendio y área forestal quemada idealmente se propone una disminución del 50% de los valores actuales, con el fin de generar un impacto significativo. En cuanto a la variable de costo de implementación, se planea mantener los costos por debajo de los costos actuales al optimizar el número de sensores desplegados bajo una restricción de costos. En cuanto al tiempo de ejecución del estudio si bien, este depende del tipo de algoritmo empleado (que en promedio puede tomar segundos [33][34] para ejecutarse), del software, de las especificaciones del computador y velocidad del procesador, el grupo Candela plantea un límite máximo de 60 minutos. Este tiempo busca garantizar la necesidad del grupo de investigación, dentro de las cuales está incluido reducir esta variable.

TABLA VI.
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Actualidad	Meta
Tiempo de detección de incendio.	Media de 2,8641 épocas.	1,43205 épocas.
Área forestal quemada	Media de 46,873% de área propensa a quemarse.	23,4365%.
Costo de implementación	Aproximadamente USD 548 363,75 solo en hardware.	Minimizar los costos o igualarlos a USD 548 363,75.
Tiempo de ejecución del estudio	El tiempo de procesamiento es de 10 veces el tiempo de simulación (en minutos). En concreto simular 1 hora, tomará 10 horas en ser simuladas.	Se propone un límite de tiempo de 60 minutos.

Posteriormente al resumen de datos obtenidos, para concluir el análisis de oportunidad, se realizó un análisis DOFA, teniendo en cuenta los factores externos e internos. Este permite identificar las oportunidades existentes en el mercado, además contribuye a orientar las actividades necesarias para el desarrollo del proyecto. En la TABLA VII se encuentran las fortalezas y debilidades.

TABLA VII.
ANÁLISIS DOFA

FACTORES INTERNOS	
Debilidades	Fortalezas
El problema de Localización de Cobertura Máxima es considerado <i>NP-hard</i> .	Gran variedad de referencias disponibles desde el acceso de la Universidad.
Falta de conocimiento del equipo sobre optimización.	Disponibilidad del director para transmitir sus conocimientos sobre investigación de operaciones y optimización.
Falta de dominio de lenguajes de programación y software.	Amplia oferta de cursos online para el aprendizaje de lenguajes de programación.
FACTORES EXTERNOS	
Amenazas	Oportunidades
Capacidad limitada del modelo y el <i>solver</i> para hallar la solución óptima.	Aplicabilidad y ajustabilidad de la alternativa propuesta para otros escenarios tanto en México como en Colombia.
	Mejora de la alternativa conforme avanza la tecnología de redes de sensores inalámbricos.
	Amplia oferta de cursos online para el aprendizaje de lenguajes de programación.

En síntesis, la integración de los sensores complementará el sistema existente en el Bosque La Primavera. Además, el proyecto generará una alternativa que se alinea al estado del mercado, las redes de sensores inalámbricos se han posicionado como un sistema efectivo para la recolección de datos, actualmente tiene un amplio campo de aplicación, como en el uso militar, monitoreo del medio

ambiente, detección biológica, entre otras. Como se menciona anteriormente, este proyecto tiene la oportunidad de ser un referente para aplicarse en otras áreas de México y Colombia, por la naturaleza del problema de cobertura, este se puede adaptar de acuerdo con los escenarios posibles y características de la región de interés.

IV. ANALIZAR

A. Análisis de Oportunidad

Para analizar la oportunidad, primero se debe conocer el problema de fondo. El problema de localización de los sensores inalámbricos está estrechamente relacionado con el Problema de Localización de Máxima Cobertura (En inglés *Maximum Coverage Location Problem* o MCLP), el cual tiene como objetivo maximizar la cobertura considerando un número predefinido de centros de atención, que suplen la demanda de varios puntos discretos localizados en el área, y un conjunto discreto de ubicaciones candidatas en las cuales se decide abrir una instalación o no [33]. Una red de sensores (En inglés *Wireless Sensor Network* o WSN) se compone de un número de nodos pequeños, conocidos como nodos sensores que tienen características como consumo energético, capacidad de detección, potencia de transmisión, etc. Entonces, una red de sensores es un conjunto de sistemas integrados que tienen la capacidad de interactuar con el medio a través de los sensores, procesando la información y comunicándola a sus vecinos [34]. La cobertura se puede definir como qué tan bien o en qué medida cada punto de una red implementada está bajo la vigilancia o atención de un nodo sensor; el objetivo entonces es verificar si todos y cada uno de los puntos en el campo de implementación están dentro del rango de detección de los sensores desplegados que forman la red.

Para identificar los factores más importantes que inciden en el desempeño del sistema de detección con red de sensores inalámbricos, se construyó un árbol de problemas (Fig. 13), detectando las causas de variación y los efectos del sistema.

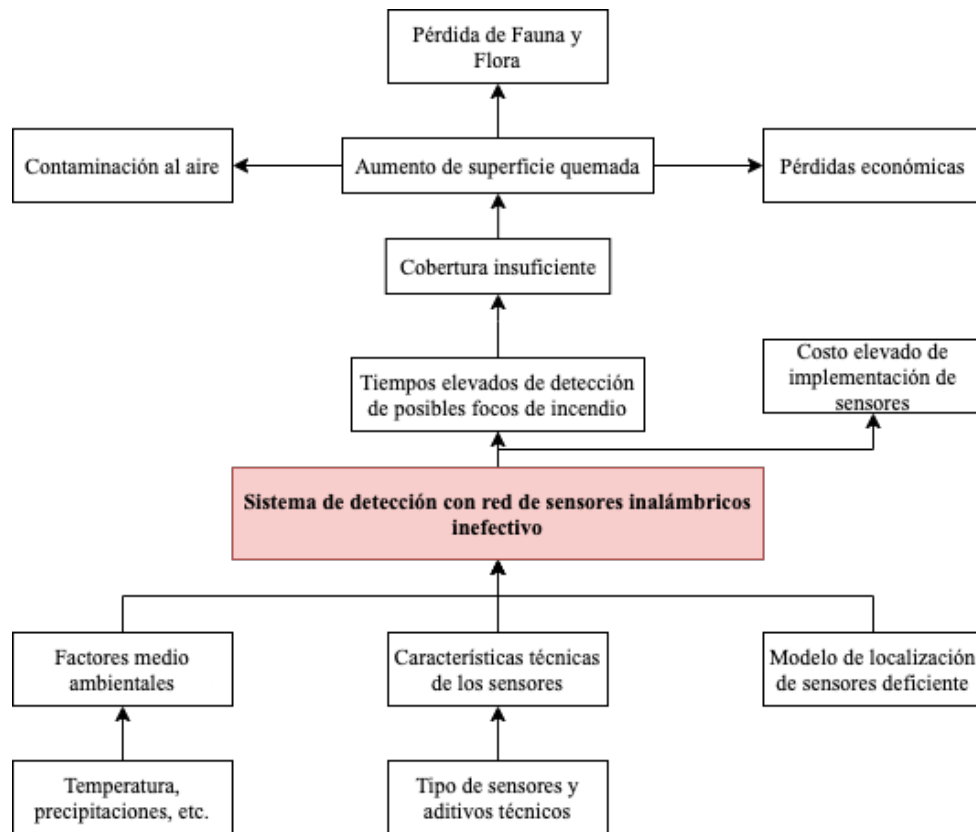


Fig. 13. Árbol de problemas.

Ahora bien, el desempeño de la cobertura se puede ver afectado por varios factores tanto técnicos, medioambientales e inherentes a las características de la red. Por ejemplo, los objetos impenetrables que se presentan en el área de despliegue pueden limitar la cobertura de la red de sensores [35]. De hecho, El Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera (APFFLP), presenta una fisiografía en una cordillera neovolcánica [36]. En este aspecto, las rocas y las grandes extensiones de bosque pueden dificultar el desempeño del sistema de cobertura total de sensores. Se pueden presentar problemas, tales como, el error de reconocimiento de un pequeño foco de fuego que está siendo ocultado por una roca o un árbol, de esta manera, el sensor tendría dificultad detectar la posibilidad de un incendio forestal y comunicarlo. Además, en la literatura se evidencia que el tipo de red puede afectar la cobertura.

De forma semejante, las condiciones climáticas, como la temperatura del ambiente también inciden en las señales inalámbricas que son emitidas por los sensores, alterando la red de comunicación efectiva y funcional del sistema. A pesar de que todos los nodos cuenten con sensores de cambios de temperatura, las señales emitidas de dichos nodos pueden alterarse al momento de enviar paquetes de datos a los demás nodos. Se puede afectar la intensidad de la señal 1 dBm por cada 10 °C de aumento en la temperatura [37]. Aparte, las lluvias que ocurran en el APFFLP también podrían atenuar la intensidad de las señales inalámbricas, generando una posible reducción del rendimiento de la comunicación entre nodos del sistema, a su vez, desencadenando tiempos altos de detección [38]. Las características de la red de sensores también son una fuente de variación del desempeño del sistema, comúnmente en la literatura se asume que los nodos sensores son homogéneos, es decir, que todos tienen la misma capacidad en términos de energía, memoria, procesamiento de datos y comunicación, lo que puede ocasionar limitaciones y problemas [39].

Por otra parte, el algoritmo empleado para la solución del modelo, las especificaciones del computador como velocidad del procesador y el software que se emplee, son factores que causan variación en el tiempo de ejecución. Por lo anterior, es importante proponer una solución eficiente computacionalmente. Por tanto, se presentan beneficios potenciales como la reducción de tiempo de diseño, reducción de costos computacionales y tiempo de análisis.

La simulación puede arrojar resultados que no se asemejen a la realidad, esto ocasiona problemas en el desempeño del modelo de localización de la red de sensores. Por lo anterior, se debe validar el ajuste de parámetros de entrada con respecto a la incertidumbre del entorno. Por otro lado, la variación se puede dar por una incorrecta definición del modelo, por ejemplo, del dominio de las restricciones. Lo que quiere indicar que los parámetros que serán ingresados al modelo afectan el desempeño y aplicabilidad del sistema de detección de incendios por medio de una red de sensores [40].

También es necesario resaltar que la implementación de un sistema de detección temprana de incendios forestales autónomo, efectivo y de bajo costo mejoraría considerablemente el problema de incendios forestales actual en el APFFLP. Anteriormente, en la etapa de medir, se demostró mediante la simulación de detección de incendios forestales de cámaras 360° que se están presentando tiempos de detección altos y porcentaje de área forestal quemada significativo (TABLA VI). Se espera que con la implementación de dicho sistema se mejore el tiempo de detección de posibles focos de fuego, lo podría contribuir a la mitigación de los incendios que se generen y así a la reducción de las áreas quemadas.

Es necesario, para el desarrollo de la oportunidad de mejoramiento descrita anteriormente tener en cuenta los requisitos del cliente, en este sentido, del Equipo de Investigación. Por medio del siguiente árbol crítico de la calidad Fig. 14 se exponen los requisitos del rendimiento del cliente, desde una visión general a una mucho más específica y detallada, con el fin de satisfacer las necesidades de manera objetiva y acertada por medio de indicadores de calidad.

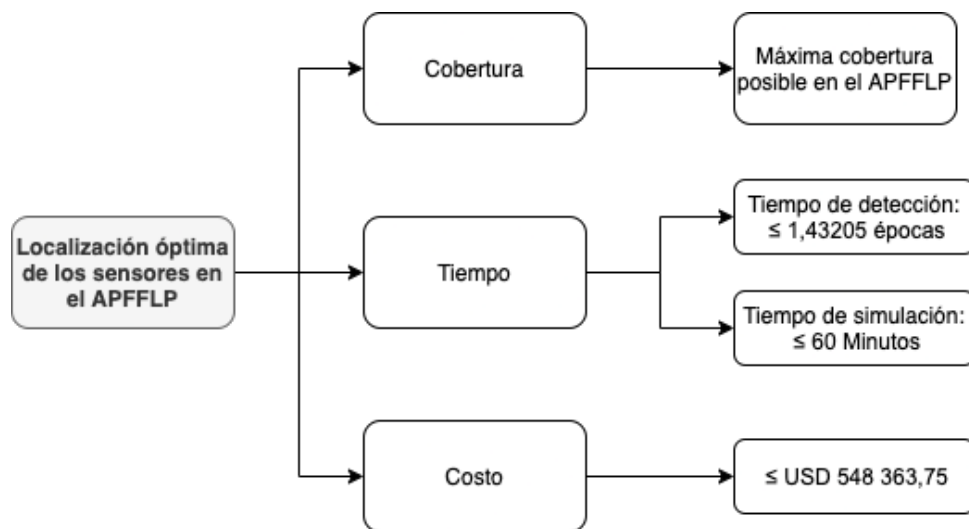


Fig. 14. Diagrama árbol crítico de la calidad.

Desde la perspectiva de las estrategias de despliegue de sensores, en la literatura se pueden encontrar dos categorías: despliegue aleatorio y despliegue determinista. El enfoque de despliegue aleatorio se basa en el supuesto de que un despliegue aleatorio requiere de nodos sensores en exceso para compensar la cobertura máxima, sin embargo, en la literatura se demuestra que esto ocasiona nodos redundantes, resultando en un costo de hardware mayor. Además, existe la oportunidad de aprovechar el factor variante del entorno para construir un modelo efectivo, de hecho, la investigación reciente muestra que el modelo de censado de un sensor es prácticamente probabilístico, en vez de determinista [41]. Por tanto, el enfoque de una localización óptima de los nodos sensores, representa una oportunidad para optimizar el tiempo de detección y la cobertura, atendiendo las necesidades del Equipo de Investigación.

B. Revisión de literatura

Para la revisión de literatura, en primera instancia se elaboró una búsqueda en *Scopus*, empleando las palabras claves “*WSN*” y “*Coverage*” y “*Optimization*”. A partir de los resultados encontrados se creó una matriz de co-ocurrencias en el software *VOSviewer* con el objetivo de observar las tendencias alrededor de los temas. En la Fig. 15 se observa que este problema tiene varios enfoques, no es de interés del proyecto explorar los relacionados al área electrónica ni a la de comunicaciones, esto es objeto del equipo de investigación en México. El enfoque de interés es el de optimización, en color amarillo se encuentran una gran concentración de la eficiencia energética (círculo más grande), puesto que tradicionalmente los problemas de cobertura tienen este objetivo; en color verde se ubican los nodos de mayor interés, que representan las soluciones a este tipo de problema, se observa que los algoritmos heurísticos tienen mayor concentración, como los genéticos (que están dentro de los llamados evolutivos) o por enjambre de partículas (En inglés *Particle Swarm Optimization* o *PSO*), también se observan palabras como “*Constraint optimization*”, “*Evolutionary algorithms*” o “*Sensor deployment*”. Teniendo en cuenta estas tendencias de investigación, se realizó una búsqueda más puntual, agregando palabras claves como “*Heuristic*”, “*Algorithm*”, “*Constraint Optimization*”, “*Evolutionary Algorithm*”, “*Sensor deployment*”, entre otras. Los resultados se resumen en el ANEXO 7.

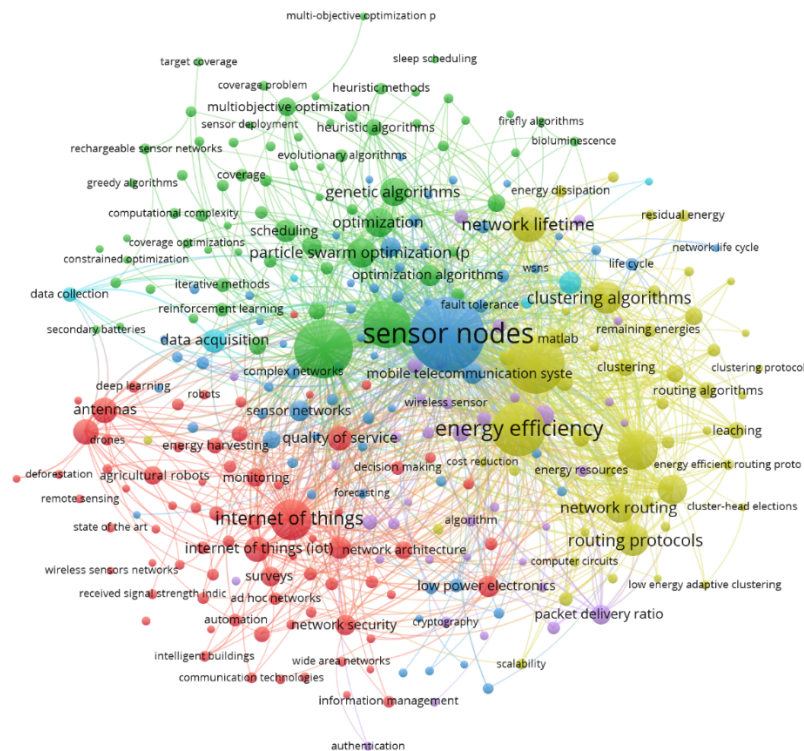


Fig. 15. Matriz de co-ocurrencias.

Como se evidenció en la matriz de co-ocurrencias, una gran cantidad de los trabajos de investigación emplean algoritmos heurísticos para solucionar el problema de cobertura. Los algoritmos heurísticos son en esencia métodos de aproximación por búsqueda de ensayo y error, dentro de estos hay variaciones como los algoritmos metaheurísticos, que pueden ser basados en la población o por trayectoria, o los algoritmos constructivos como los llamados algoritmos codiciosos o voraces.

Por ejemplo, en el artículo de investigación *Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones* [42] se investiga un problema de cobertura con instalaciones capacitadas y drones con restricción de rango, los autores proponen tres soluciones, una a partir de formulación de programación lineal entera, una con un algoritmo heurístico codicioso o voraz (En inglés *Greedy Heuristics*) y otra con una heurística de 3 etapas (En inglés *Three Stage Heuristics* o *3SH*). La heurística voraz se basa en un proceso de crear y clasificar una matriz de peso, asignar la demanda a instalaciones abiertas, los drones a instalaciones abiertas y la demanda a drones; lo que garantizará que se cumplan las limitaciones de capacidad de la instalación y alcance de los drones. Por su parte, la heurística 3SH resuelve el problema en tres pasos. En la primera etapa, resuelve un problema de ubicación de una instalación y determina las instalaciones que se ubicarán y los puntos de demanda que se asignarán a cada instalación. En la segunda etapa se resuelven problemas de mochila para asignar drones a instalaciones y puntos de demanda a drones. En la tercera etapa, se aplica una heurística de intercambio para mejorar la solución. Al final, estos se comparan obteniendo que el algoritmo con programación lineal entera entrega soluciones de buena calidad, pero tiene un tiempo de ejecución extremadamente alto e inaceptable, el algoritmo voraz es bastante rápido, pero a costa de la calidad de la solución, este pierde casi un 20% de la cobertura, mientras que la heurística de 3 etapas está dentro del 5% de las mejores soluciones del solver y requiere un tiempo de ejecución sustancialmente menor.

Otro ejemplo de este enfoque es el artículo de investigación *A Bipopulation-Based Evolutionary Algorithm for Solving Full Area Coverage Problems* [35] en el que diseñan una estrategia para el despliegue de sensores para asegurar un estado de cobertura máxima con el mínimo de sensores en un área predeterminada con obstáculos impenetrables. Se emplea un algoritmo evolutivo bipoblacional de cobertura total (En inglés *Bipopulation-based Evolutionary Algorithm for Full Area Coverage*) de última generación y se compara con un algoritmo de despliegue determinista (Obstacle-Resistant Deployment Algorithms) y uno metaheurístico reciente (Multiobjective Optimization Approach for Sensor Arrangement). Como resultado, el BEFAC supera a los métodos de despliegue convencionales en términos de la cantidad de sensores y la cantidad de evaluaciones de aptitud necesarias, además de lograr un estado de cobertura total con un número mínimo de sensores desplegados en la región objetivo.

En el artículo de investigación *Probabilistic Dynamic Deployment of Wireless Sensor Networks by Artificial Bee Colony Algorithm* [43] un algoritmo de colonia de abejas artificiales (En inglés *Artificial Bee Colony* o *ABC*) es aplicado para el despliegue dinámico de redes de sensores fijas y móviles con el objetivo de lograr un mejor rendimiento al intentar aumentar el área de cobertura de la red, además también se compara el rendimiento contra el del algoritmo de optimización del enjambre de partículas (PSO). Aquí consideran un modelo de detección probabilístico que obtiene resultados más realistas al calcular efectivamente el área cubierta. En este caso, los resultados de la simulación muestran que el algoritmo ABC obtiene mejores implementaciones para WSN que el algoritmo PSO.

Por otro lado, el problema de cobertura también puede resolverse desde programación lineal entera (En inglés *Integer Linear Programming* o *ILP*), como en [42], mencionado anteriormente. En el artículo de investigación *Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks* [44] se plantea una solución para el Problema de Cobertura Máxima con Sensores Mínimos (MCMS) proporcionando cobertura y maximizando la vida útil de la red a través de extensas simulaciones. La solución se basa en una formulación de programación lineal entera (*ILP*), se utilizan otras dos soluciones con algoritmo codicioso centralizado (En inglés *Centralized Greedy Algorithm* o *CGA*) y otro algoritmo codicioso distribuido (En inglés *Distributed Greedy Algorithm* o *DGA*) como línea base de comparación. Los resultados muestran que el índice de cobertura, en la solución *ILP* siempre se comporta mejor que en los otros dos esquemas, que en el *DGA* se aproxima al de *CGA* con todos los valores n (número de sensores); para el número de sensores activados, el algoritmo *DGA* activa el mayor número de sensores en la mayoría de los casos; mientras que las curvas que representan el número de sensores activos por los algoritmos *ILP* y *CGA* pueden cruzarse en algunos puntos, en el *ILP* se estabiliza en un valor más bajo que en el de *CGA*. Otro ejemplo es el propuesto en *Maximizing Lifetime for a Zone Monitoring Problem Through Reduction to Target Coverage* [45] en el que presentan la formulación de programación lineal entera (*ILP*) con algoritmos basados en el método de generación de columnas (En inglés *Column Generation* o *CG*) para programar los estados activo e inactivo del sensor para maximizar la vida útil de la red en dos tipos de escenarios. Al final concluyen que este enfoque se puede utilizar para obtener una vida útil más larga de la red, en particular cuando se aplica a la cobertura de área o para escenarios de cobertura objetivo con un gran número de objetivos. También en el artículo *An exact approach to extend network lifetime in a*

general class of wireless sensor networks [46] emplean una formulación de larga escala de programación lineal con un enfoque de generación de columnas (CG) combinado con un procedimiento de bifurcación y corte (En inglés *Branch-and-Cut*) para la extensión de la vida útil de la red en redes de sensores inalámbricos considerando la cobertura proporcionada. El propósito es identificar *schedules*, representados como la asignación de roles a los sensores y un intervalo de tiempo para asumir dichos roles, mientras se cubren los objetivos de y se transmiten las señales a la estación base. Los roles representan la dirección del sensor, el rango de detección, el modo de comunicación y combinaciones de estos. Tras pruebas en un conjunto extenso de instancias aleatorias para evaluar el desempeño, se obtuvo que el enfoque propuesto tiene capacidad para computar la solución óptima o soluciones factibles de buena calidad en tiempos computacionales pequeños.

En el artículo de investigación *On the deployment of large-scale wireless sensor networks considering the energy hole problema* [39] los autores consideran una red de sensores heterogénea, con dos tipos de sensores, un primer conjunto pequeño de sensores de gama alta (sensores H), con una potencia de transmisión más alta y mejor capacidad de batería y un segundo conjunto compuesto de una gran cantidad de sensores de gama baja (sensores L). A su vez enfocan la solución para considerar el “problema del agujero de energía” sin comprometer la cobertura, este problema se da cuando la vida útil de una red de sensores uniforme desplegados se limita fuertemente por los sensores en el primer salto hacia el *sink* o nodo de salida. Ellos presentan un modelo comparativo capaz de representar una variedad de escenarios desde un despliegue total aleatorio hasta uno estocásticamente planificado de la red de sensores. En concreto, emplean un modelo estocástico llamado *Multilevel Marked Point Process* (M²P²) para el despliegue planificado, dentro del cual desarrollan dos estrategias para desplegar los nodos L, llamadas modelo Q y modelo P, ambos representan un proceso Poisson no homogéneo. Aparte comparan estos dos modelos de despliegue con el modelo de ubicación uniforme aleatorio (En inglés *Uniform Random Placement* o URP) que se caracteriza por un proceso Poisson con parámetro $\lambda=1$. Empleando una simulación de Montecarlo, se encuentra que, con una métrica propuesta, esta tiene una amplia variedad de aplicaciones tanto en el diseño como en la operación de redes de sensores inalámbricos. Con el enfoque propuesto se evalúan variables de desempeño entre las estrategias propuestas, los resultados muestran que el modelo Q es el más adecuado para abordar el agujero de energía en redes homogéneas, mientras que el modelo P logra la cobertura más alta y supera todos los demás modelos para redes heterogéneas.

Por último, otra de las alternativas halladas es por un enfoque de programación por restricciones, en inglés *Constraint Programming* (CP), puesto que muchos problemas en informática, especialmente en inteligencia artificial, pueden modelarse casos especiales del problema de satisfacción de restricciones (*Constraint Satisfaction Problem*). Por ejemplo, en *A Constraint Programming approach for coverage optimization problem in WSN* [47] para resolver el problema de cobertura óptima en redes de sensores inalámbricos, los autores proponen un enfoque de optimización por restricciones combinado con un análisis de visibilidad del espacio con un Sistema de Información Geográfica (En inglés *GIS*) llamado *LandSerf 3D viewer*. En este algoritmo (abreviado *BTWSN*) se define un conjunto de variables, un conjunto de restricciones de esas variables, y un conjunto de dominios. El algoritmo propuesto es basado en uno de búsqueda en retroceso (*Backtracking*), este mapea cada etiqueta completa de variables (solución) a un vector numérico. Como la búsqueda procede, el vector óptimo de cobertura se establece en el valor de la mejor solución encontrada hasta ahora, el algoritmo termina cuando se han probado todas las posibles asignaciones. Con esto, logran obtener una solución óptima que maximiza el área cubierta por un número dado de sensores, y también una solución al problema de cobertura múltiple en *WSN*.

A través de la revisión de la literatura se pudo identificar varias tendencias de enfoque para los problemas de cobertura, se observa que la optimización por medio de modelos de algoritmos heurísticos, metaheurísticos como los evolutivos o basados en la naturaleza, modelos estocásticos y programación por restricciones son ampliamente usados para resolver esos problemas. En general, se puede notar que los algoritmos y modelos son ajustables para diferentes escenarios y objetivos, los problemas de maximización de cobertura tienen un amplio campo de aplicación, así como las redes de sensores también tienen varias aplicaciones, entre ellas, el monitoreo del medio ambiente, el uso militar y en general para recolectar información en locaciones inhóspitas. Asimismo, la mayoría de los trabajos de investigación proporciona una comparación entre sus propuestas y otras soluciones referenciales extraídas de la literatura que son útiles para el proyecto.

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Después de realizar el análisis de la oportunidad se realizó una exploración de ideas por medio de la técnica de lluvia de ideas teniendo en cuenta la información recopilada en la revisión de literatura y recomendaciones del Equipo de Investigación. Se decidió que las alternativas a evaluar son:

- Programación Por Restricciones (PPR)
- Algoritmos Evolutivos (AE)
- Heurísticas Constructivas con Criterios Especificados (HCCE)
- Modelo Estocástico (ME)
- Modelo en *Local Solver* (MLS).

La PPR se basa en crear un modelo formado por variables, para las cuales se debe indicar qué posibles valores pueden tomar, y restricciones, que expresan relaciones que deben cumplirse entre esas variables. Una vez creado el modelo, el sistema se encarga de encontrar aquella solución óptima que se ajuste a las restricciones [43]. Por otro lado, el AE es una alternativa de optimización que se usa usualmente en problemas que tienen espacios de búsqueda extensos, en donde otros tipos de métodos no son capaces de encontrar soluciones rápidamente. Este algoritmo sigue la teoría de la evolución como lo indica su nombre, en vez de seres vivos, se tienen posibles soluciones al problema. Las soluciones son comparadas y las más adecuadas tienen más posibilidades de sobrevivir, es por esto que la población, o grupo de soluciones, va mejorando gradualmente hasta llegar a una solución cercana a la óptima [48].

Las HCCE consisten en un procedimiento iterativo que, paso a paso, se van completando, añadiendo elementos hasta encontrar una buena solución, contrario a los métodos exactos que proporcionan la solución óptima del problema. Esto lleva a tener menores tiempos de procesamiento [49]. Los ME son métodos de optimización en donde uno o más parámetros del problema son modelados a través de variables aleatorias. En esta clase de modelos se tienen en cuenta probabilidades de ocurrencia de ciertos eventos para que así la modelación del problema se acerque un poco más a la realidad. El MLS es el principal solucionador de optimización global, que combina técnicas exactas y heurísticas. Más allá de proporcionar solución eficiente y escalable para la optimización matemática, el equipo ofrece un ambiente receptivo para modelar y resolver problemas. Este software explora el espacio de las soluciones, variando las variables poco a poco hasta encontrar una solución cercana a la óptima [50].

Para esta evaluación se hizo uso de la metodología de Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés). Una vez establecidas las alternativas se deben elegir los criterios de evaluación, estos se eligieron teniendo en cuenta aquellos factores que las diferencian y que tienen influencia sobre la realización y resultados del proyecto. Se estableció que los criterios serán:

- Facilidad de implementación
- Tiempo de ejecución
- Costos
- Calidad de la solución

En la TABLA VIII se muestran los resultados de la comparación por pares de los criterios donde se define la importancia de cada criterio para la evaluación, para así determinar el criterio que va a influir más en los puntajes finales de cada alternativa. Se compara el criterio de la parte izquierda de la tabla, es decir el criterio base, con cada uno de los criterios de la parte superior. Si se considera que el criterio base, es más importante que el criterio de la parte superior de la tabla se coloca un número mayor a uno, entre más grande mayor será la importancia del criterio base sobre el otro, si por el contrario se tiene que el criterio base es menos importante que el criterio de la parte superior entonces se asigna un número menor a uno en el cuadro comparativo.

TABLA VIII.
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (CRITERIOS)

Crterios	Facilidad de implementación	Tiempo de ejecución	Costos	Calidad de la solución	Prioridades
Facilidad de implementación	1	1/2	2	1/3	16%
Tiempo de ejecución	2	1	3	1/2	28%
Costos	1/2	1/3	1	1/4	10%
Calidad de la solución	3	2	4	1	47%

Después de realizar la matriz de comparación por pares se deben normalizar los puntajes y sumarse para obtener el vector prioridades, estos porcentajes representan el peso ponderado de cada criterio. Esta matriz de comparación por pares y todas las que serán presentadas a continuación son consistentes, es decir que los valores asignados en cada comparación están relacionados con los demás de la matriz.

Para comparar las alternativas se tienen que realizar la matriz de comparación por pares por cada uno de los criterios. Para el criterio de facilidad de implementación entre más fácil sea implementar una alternativa más preferible será. El análisis se realizó considerando qué tan factible es modelar y simular el sistema actual; algunos de los factores tenidos en cuenta son la necesidad de tener conocimientos de lenguajes de programación y la dificultad de este.

TABLA IX.
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN)

Alternativas	PPR	AE	HCCE	ME	MLS	Prioridades
PPR	1	1	1	1/3	1/3	11%
AEP	1	1	1	1/3	1/2	12%
HCCE	1	1	1	1/3	1/2	12%
ME	3	3	3	1	2	39%
MLS	3	2	2	1/2	1	25%

A la hora de evaluar las alternativas teniendo en cuenta el criterio de tiempo de ejecución, este depende del software o programa utilizado, entre más tiempo de ejecución pueda llegar a tener una alternativa será menos preferida.

TABLA X.
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (TIEMPO DE EJECUCIÓN)

Alternativas	PPR	AE	HCCE	ME	MLS	Prioridades
PPR	1	1/7	1/9	1/3	1/7	3%
AEP	7	1	1/3	5	1	22%
HCCE	9	3	1	7	3	47%

ME	3	1/5	1/7	1	1/5	6%
MLS	7	1	1/3	5	1	22%

Para el criterio de costos se tiene en cuenta si es necesario algún programa que conlleve a costos de instalación o de licencia, algunas de las alternativas no tienen ningún costo asociado a su implementación, por lo que claramente son preferidas sobre las demás.

TABLA XI.
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (COSTOS)

Alternativas	PPR	AE	HCCE	ME	MLS	Prioridades
PPR	1	1/2	1/2	6	6	22%
AEP	2	1	1	7	7	35%
HCCE	2	1	1	7	7	35%
ME	1/6	1/7	1/7	1	1	4%
MLS	1/6	1/7	1/7	1	1	4%

Por último, en cuanto al criterio de calidad de la solución, que indica si la solución de la alternativa es cercana a la óptima, entre mejor se considere que una alternativa pueda solucionar el MCLP se considera más preferible.

TABLA XII.
MATRIZ DE COMPARACIÓN POR PARES (CALIDAD DE LA SOLUCIÓN)

Alternativas	PPR	AE	HCCE	ME	MLS	Prioridades
PPR	1	3	6	1	3	34%
AE	1/3	1	4	1/3	1	13%
HCCE	1/6	1/4	1	1/6	1/4	5%
ME	1	3	6	1	3	34%
MLS	1/3	1	4	1/3	1	13%

Teniendo en cuenta los diferentes vectores prioridades de cada una de las matrices de comparación por pares se prosigue a calcular el puntaje total correspondiente a cada alternativa, los resultados se pueden observar en la TABLA XIII. La alternativa con el porcentaje más alto es el ME, lo que indica que presenta la mayor preferencia y que debería ser elegida para desarrollar la oportunidad de este proyecto. Cabe resaltar que en el caso de que se presenten inconvenientes al aplicar modelos estocásticos existen dos alternativas con porcentajes totales muy cercanos, por lo que se podría realizar un cambio de alternativa si se considera necesario. El desarrollo de la metodología AHP puede observarse en el ANEXO 8.

TABLA XIII.
VECTOR RESULTADO

Alternativas	TOTAL
--------------	-------

PPR	20,87%
AE	17,49%
HCCE	20,46%
ME	24,46%
MLS	16,71%

D. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un modelo de optimización para definir la localización de una red de sensores inalámbricos minimizando el tiempo hasta detección.

Objetivos específicos

1. Identificar en la literatura modelos para la localización óptima en redes de sensores inalámbricos que puedan adaptarse para minimizar el tiempo hasta detección.
2. Adaptar el modelo de optimización para que considere la periodicidad de incendio del área del problema.
3. Desarrollar el código en el lenguaje seleccionado para generar escenarios aleatorios, extraer los datos paramétricos y ejecutar el modelo.
4. Validar la propuesta por medio de simulación comparándola con otros escenarios. Esto con el fin de verificar si se reducen los indicadores tiempo de detección, costos y área forestal quemada.

E. Plan de trabajo (PdT)

A continuación, se encuentra el plan de trabajo del equipo, este corresponde a un resumen de las actividades a desarrollar para cumplir con los objetivos específicos, a partir de actividades y sus respectivos entregables. Esta planeación se desarrolló mediante la herramienta *Microsoft Project*, dentro de la cual se definieron fechas de entregas para las actividades y además se identificó que las tareas de los objetivos de construir y validar son críticas para el cumplimiento del plan. Ver ANEXO 9.

TABLA XIV.
PLAN DE TRABAJO

Objetivo general						
<i>Diseñar un modelo de optimización para definir la localización de una red de sensores inalámbricos para minimizar el tiempo hasta detección y maximizar la cobertura.</i>						
Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Actividad	#	Entregable (alcance)	Fecha entrega
Identificar en la literatura modelos para la localización óptima en redes de sensores inalámbricos que puedan adaptarse para minimizar el tiempo hasta detección.	N/A	N/A	1.1 Estructuración de ecuaciones de búsqueda.	N/A	Listado de ecuaciones.	mar 31/08/21
	N/A	N/A	1.2 Revisión detallada de artículos.	N/A	Listado de documentación.	mar 31/08/21
	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Modeling Approaches</i>	1.3 Selección de modelos.	A	Listado de modelos.	jue 09/09/21
	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Linear Programming (LP)</i>	1.4 Selección de métricas.	B	Listado de métricas.	jue 09/09/21

Adaptar el modelo de optimización para que considere la periodicidad de incendio del área del problema.	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Operations Research</i>	2.1 Selección de variables de decisión del modelo.	A	Variables de decisión.	mié 15/09/21
			2.2 Identificación de la información de entrada relevante para el diseño del modelo		Conjuntos y parámetros.	mié 15/09/21
	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Stochastic Programming</i>	2.3 Formulación matemática del modelo de optimización	K	Modelo matemático.	mar 21/09/21
Desarrollar el código en el lenguaje seleccionado para generar escenarios aleatorios, extraer los datos paramétricos y ejecutar el modelo	N/A	N/A	3.1 Selección de lenguaje de programación	N/A	Nombre del lenguaje.	lun 02/08/21
	N/A	N/A	3.2 Capacitación en lenguaje de programación	N/A	Certificado de inscripción.	lun 23/08/21
	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Stochastic Programming</i>	3.3 Implementación computacional de los modelos		Modelo matemático en lenguaje de programación.	mié 01/09/21
	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	<i>Control Charts and Process Capability</i>	3.4 Verificación de resultados y corrección de errores	C	Resultados analizados.	vie 10/09/21
Validar la propuesta por medio de simulación comparándola con otros escenarios. Esto con el fin de verificar si se reducen los indicadores tiempo de detección, costos y área forestal quemada.	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	<i>Design of Experiments</i>	4.1 Diseño de experimentos para evaluar los métodos de optimización.	F		jue 30/09/21
	<i>Operations Research and Analysis</i>	<i>Simulation</i>	4.2 Implementación computacional de las simulaciones	M		lun 11/10/21
	<i>Quality & Reliability Engineering</i>	<i>Control Charts and Process Capability</i>	4.3 Evaluación de los indicadores de desempeño	C	Gráficos de control.	lun 25/10/21

V. MEJORAR

A. Modelo matemático propuesto

En este apartado, se diseña un modelo de programación lineal para encontrar la ubicación óptima de los sensores del sistema de detección de incendios en el APFFLP. Se variará el número de sensores que serán distribuidos en el terreno por cada conjunto de experimentos, por otro lado, los parámetros de entrada tales como la probabilidad de incendio, el punto de inicio, la trayectoria del incendio y la presencia de vegetación son aleatorios. Dichos parámetros funcionan de entrada para el parámetro de prioridad de la zona, que se establece como el inverso del periodo en que se incendia la cuadrícula, a manera tal de obtener una posible solución más realista.

El modelo de programación lineal entera mixta propuesto se basa en el Problema de Máxima Cobertura, en el cual, se busca maximizar la cobertura dado un número predefinido de centros de atención, para este caso, se busca maximizar la cobertura de la zona de acuerdo con la prioridad que tenga cada una, con un número definido de sensores distribuidos en el área.

Notación del modelo

Conjuntos

$N \rightarrow$ Conjunto de zonas (nodo o cuadrícula) a monitorear, depende del tamaño del área seleccionada

$E \rightarrow$ Conjunto de escenarios aleatorios

Parámetros

$P_{me} \rightarrow$ Prioridad de cobertura de un nodo $m \in N$ en el escenario $e \in E$

$B_{nm} \rightarrow 1$ si nodo $m \in N$ se encuentra en la zona de cobertura de $n \in N$, 0 de lo contrario (depende del radio del sensor)

$S \rightarrow$ número de sensores a ubicar

Variables de decisión

$x_n \rightarrow 1$ si se ubica un sensor en el nodo n , 0 de lo contrario

$y_{me} \rightarrow 1$ si en el escenario e el nodo m es monitoreado por al menos un sensor, 0 de lo contrario

Función objetivo

La maximización de la cobertura se expresa en (5), dado esta función, se permite minimizar el tiempo hasta detección, pues la prioridad se entiende como el inverso del periodo de incendio detectado.

$$\text{Maximizar: } \frac{1}{|E|} * \sum_{e \in E} \sum_{m \in N} y_{me} P_{me} \quad (5)$$

Restricciones

1. Restricción de cobertura. Un nodo n estará cubierto ($y_{me} = 1$) si por lo menos hay un sensor en la zona l que pueda cubrirlo, de lo contrario, el nodo n no estará cubierta ($y_{me} = 0$) en el escenario e .

$$\sum_{n \in N} x_n * B_{nm} \geq y_{me} \quad \forall m \in N, e \in E \quad (6)$$

2. Restricción de sensores. Se deben ubicar a lo sumo, un número limitado de sensores S .

$$\sum_{n \in N} x_n = S \quad (7)$$

3. Restricción de integralidad. Todas las variables asumen un número real no negativo para que el problema tenga una solución factible.

$$x_n, y_{me} \geq 0 \quad \forall n \in N, e \in E; x_n, y_{me} \in [0,1] \quad (8)$$

B. Validación del diseño propuesto

En esta sección se ejecuta una primera simulación del modelo para varios escenarios aleatorios variando el número de sensores y el radio de sensibilidad. El modelo de programación lineal fue programado en Julia 6.2 haciendo uso del optimizador Gurobi 9.1.2 ejecutado en un computador con procesador Intel® Core™ i5 y 8 GB de RAM.

El modelo considera un área de cuadrícula de 100x100 y un radio de detección inicial de 3 casillas, un número de 10 sensores. Para mejorar el modelo inicial, se reemplazó la probabilidad establecida de 0,6 para la densidad de la vegetación con un proceso más exacto. Inicialmente, el código (ANEXO 14) recibe una imagen RGB que corresponde a una fotografía aérea de una zona del APFFLP, convierte esta imagen en un mapa de bits (Fig. 16), como resultado se tiene una matriz de dimensiones $n \times n$ donde n representa la dimensión de la imagen en píxeles, los valores dentro de la matriz varían de 0 a 255. Estos valores se interpretan entonces como el peso de cada cuadrícula, que, a la vez, representa un indicador de inflamabilidad. Para representar que no toda la zona es inflamable, se tomaron únicamente en cuenta los indicadores que se encuentren por encima del percentil 20, es decir, todas las cuadrículas que estén por debajo se consideran sin vegetación. Con esta información procede a ejecutar las siguientes iteraciones.

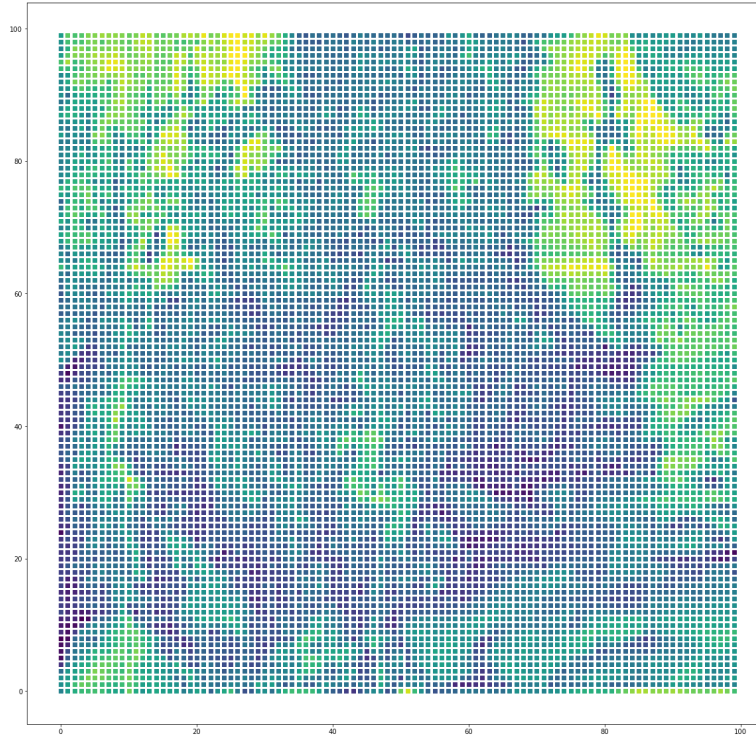


Fig. 16. Mapa de bits de la imagen del área.

Posteriormente, se ejecutó una simulación de Montecarlo con 100 escenarios aleatorios que retornaran la trayectoria de un incendio y la prioridad de cobertura de cada nodo en cada escenario que se entiende como el inverso del periodo en que se quema la cuadrícula. El inicio del incendio se ubicó en una posición aleatoria entre las fronteras del área para representar que el incendio generalmente se puede dar en estas zonas, puesto que se conoce que, los incendios en su mayoría se generan por factores humanos tras el paso de las personas por los caminos en el APFFLP [51].

En la Fig. 17, se muestra el mapa de calor para un escenario e , la escala de calor indica el periodo de detección del fuego, indicando que el inicio de fuego se da en el borde inferior y avanza por toda la cuadrícula. No obstante, los valores que se muestran en la escala no son finales pues se van actualizando a medida que avanza la simulación.

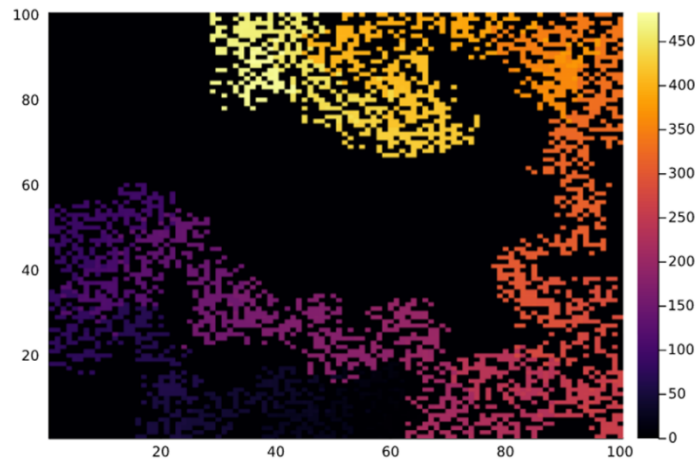


Fig. 17. Mapa de calor de la trayectoria del incendio.

Con estos datos de entrada se procede a ejecutar el modelo de optimización para que arroje las locaciones óptimas de los sensores.

Gurobi halló una solución factible en 8,97 segundos. Se asume este valor como el tiempo de ejecución.

```
Explored 0 nodes (8792 simplex iterations) in 8.97 seconds  
Thread count was 8 (of 8 available processors)
```

Fig. 18. Impresión del resultado del modelo de optimización.

Para calcular las métricas necesarias que corresponden a los *KPI'S* previamente definidos, se realizan 100 repeticiones con locaciones óptimas de los sensores y trayectorias de incendio diferentes, pero con el mismo parámetro inicial de vegetación de la zona.

Ahora bien, para la validación del modelo en las condiciones establecidas, se efectuaron otras 100 repeticiones, pero con locaciones aleatorias. En la siguiente figura, se resume el proceso que ejecuta el modelo internamente.

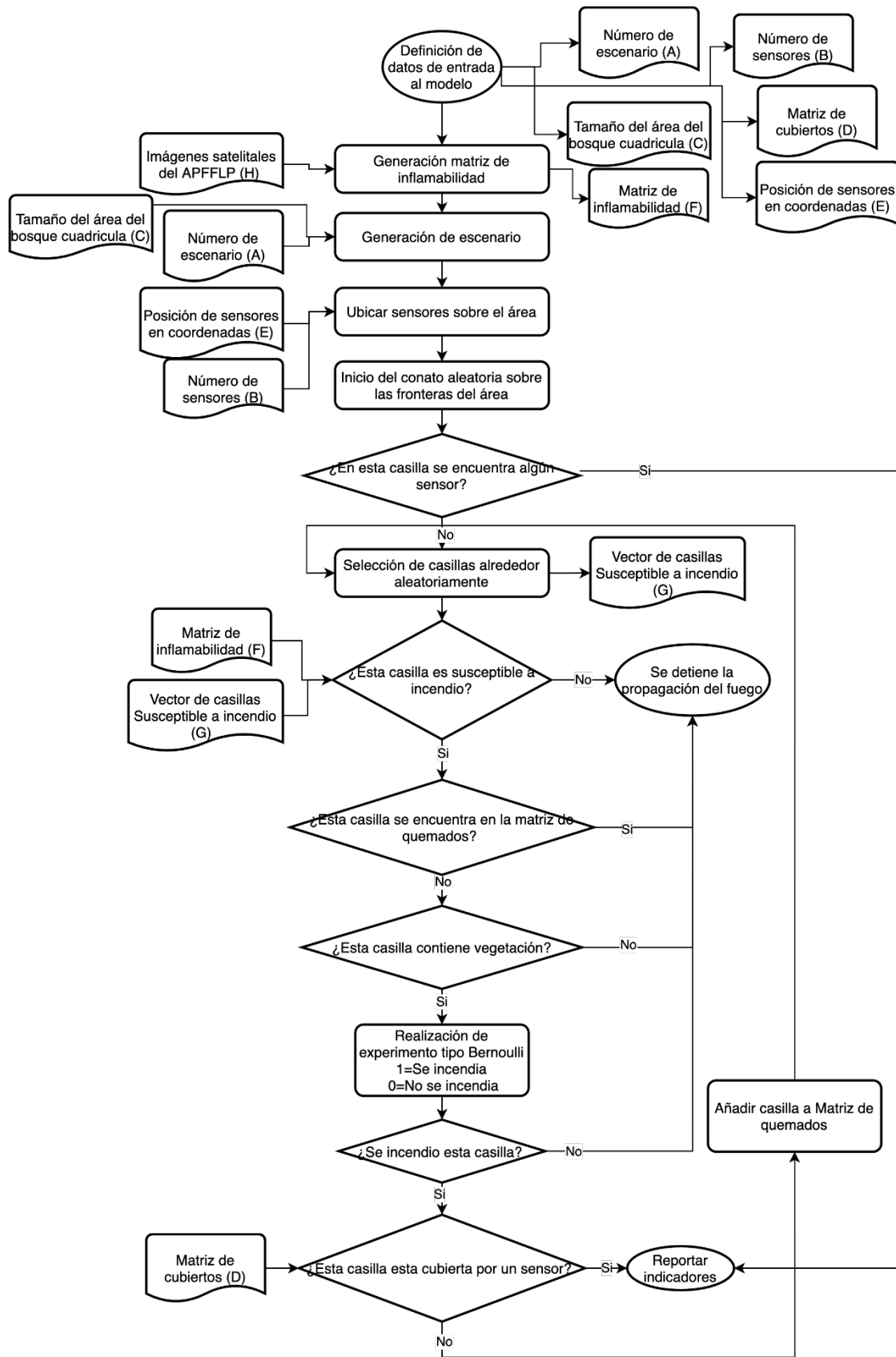


Fig. 19. Diagrama de flujo del modelo de optimización.

Adicionalmente, se realizaron combinaciones variando el radio de sensibilidad del sensor (entre 2 y 5 casillas que representan los sensores de bajo alcance que se pretenden usar y el número de sensores, por cada combinación se ejecutaron 5 experimentos para comparar los resultados de los *KPI's*. En la siguiente tabla se encuentran los resultados, como se puede apreciar, efectivamente a mayor cantidad de sensores, mejoran los indicadores tiempo promedio hasta detección y porcentaje promedio de área quemada hasta detección.

TABLA XV.
RESUMEN DE RESULTADOS

Num. Sensores/radio	Tiempo promedio hasta detección (épocas)				Promedio área quemada hasta detección (%)			
	2	3	4	5	2	3	4	5
5	24,6	6,8	39,2	19,4	2,3160	0,8602	4,2514	1,9653
6	86,8	18,6	83,2	7,8	8,5459	2,0513	8,5856	0,8238
7	53,2	12,2	10	45,4	4,9992	0,9065	0,9264	4,6485
8	31,2	32,6	44,4	6,8	3,2589	3,8677	4,3838	0,5360
9	59,8	26,6	21,4	93,8	5,8495	2,5740	1,9884	9,1117
10	54	2,6	6,8	44	5,2308	0,2184	0,8040	4,8238
11	14,4	34	16	39,6	1,5484	3,4309	1,8528	3,7188
12	42,4	56,4	30,2	5,4	4,2647	5,4988	2,9280	0,5492
13	47,8	4,4	2,6	23	5,3267	0,4731	0,1952	2,3358
14	8,4	1,4	13,4	6	0,8734	0,0662	1,5318	0,5194
15	12,2	7,6	12,8	2,8	1,2605	0,6385	1,3300	0,2514

A partir de los resultados de los experimentos, para el área tomada la mejor solución es ubicar 14 sensores.

Por otro parte, se abstraigo el tiempo de ejecución de cada experimento, en promedio el modelo tarda 6,63 segundos en hallar una solución. En la siguiente tabla, se resumen los 44 resultados.

TABLA XVI.
RESUMEN RESULTADOS

Num. Sensores/radio	Tiempo de Ejecución (seg)			
	2	3	4	5
5	0,93	1,84	4,73	11,21
6	0,94	1,63	3,07	11,59
7	0,92	2,16	3,14	22,92
8	1	1,63	3,11	11,02
9	0,99	1,71	2,97	11,29
10	0,96	1,67	2,94	14,87
11	1,02	1,67	4,1	21,27
12	0,93	1,7	3,11	12,31
13	0,93	1,67	3,96	27,35
14	0,91	1,61	3,21	55,47
15	0,96	1,92	3,89	24,68

Finalmente, para el costo de implementación, se calculó un costo estimado basado en el costo unitario para cada número de sensores.

TABLA XVII.
COSTO POR NÚMERO DE SENSORES

Costo sensores (USD)	
Num. Sensores	Costo
5	462,21
6	670,82
7	734,22
8	797,62
9	1006,23
10	1069,63
11	1133,03
12	1196,43
13	1405,04
14	1468,44
15	1531,84

Partiendo de los resultados de los experimentos se realiza un análisis estadístico, del cual se obtienen los intervalos de confianza para el tiempo promedio hasta detección y el porcentaje promedio de área quemada. Aparte, se realizan pruebas de hipótesis entre las simulaciones con las ubicaciones aleatorias de los sensores y ubicación óptima de los sensores arrojada por el modelo. Esto con el objetivo de determinar si realmente se reducen los tiempos de detección y porcentaje de área quemada con la ubicación óptima de los sensores.

Se quiere comparar el tiempo de detección con modelo matemático con el tiempo de detección con distribución aleatoria de los sensores, para esto, lo primero fue efectuar una prueba de hipótesis para probar si la información se ajusta a un comportamiento normal, mediante el método de Anderson Darling con ayuda del programa estadístico Minitab (ANEXO 12), como los Valores P para esa prueba arrojaron menores que 0.05, entonces se puede afirmar estadísticamente que las variables de tiempo de detección no siguen una distribución normal.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$

Hipótesis alterna $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Estadística

Método de prueba	GL1	GL2	Valor p
Bonett	1,82	1	0,177
Levene	4,72	1 198	0,031

Fig. 20. Resultados prueba de dos varianzas para tiempo de detección.

Seguido de la prueba de normalidad se realizó una prueba de dos varianzas para determinar si las varianzas entre dos variables difieren, en este caso al ser variables que no siguen una distribución normal se debe tener en cuenta el resultado del Valor P para el test de Levene, es decir 0,031 que es menor que el nivel de significancia 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que las varianzas del tiempo de detección con modelo matemático y con distribución aleatoria de los sensores son diferentes.

Prueba

Hipótesis nula: $\text{Media}(\text{Tiempo de detección con Modelo}) - \text{Media}(\text{Tiempo de detección con Distrib}) \geq 0$
 Hipótesis alterna: $\text{Media}(\text{Tiempo de detección con Modelo}) - \text{Media}(\text{Tiempo de detección con Distrib}) < 0$
 Nivel de significancia: 0,05

GL	Valor T	Valor p
186	-3,2534	0,001

Valor $p \leq 0,05$. Se puede afirmar que $\text{Media}(\text{Tiempo de detección con Modelo}) < \text{Media}(\text{Tiempo de detección con Distrib})$.

Fig. 21 Resultados prueba de equivalencia de dos muestras para tiempo de detección.

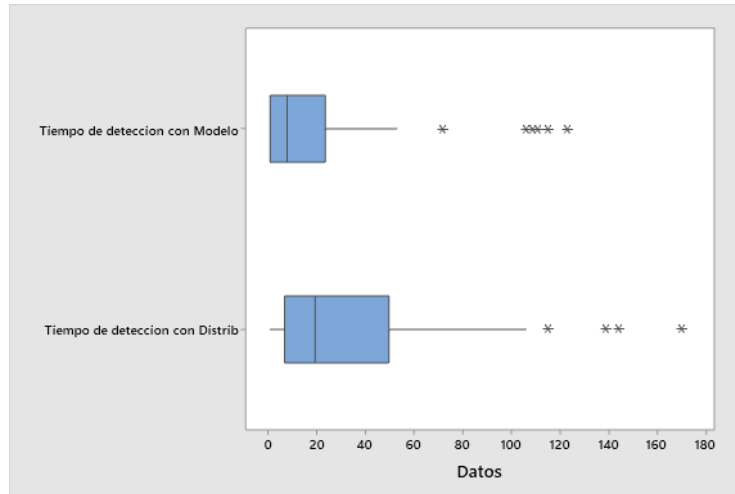


Fig. 22. Diagrama de cajas de prueba de equivalencia para tiempo de detección.

Por último, se realizó una prueba de equivalencia entre dos muestras. Esta prueba arrojó como resultado un Valor P de 0.001, menor que el nivel de significancia, por lo que se puede afirmar que el promedio de los tiempos de detección con el modelo matemático es menor que el de los tiempos de detección con una distribución de sensores aleatoria. Además de esto se puede evidenciar gráficamente en la figura 22 como los datos del tiempo de detección con modelo matemático se encuentran mucho más agrupados hacia la izquierda.

El mismo procedimiento se realizó para comparar las variables de porcentaje de área forestal quemada con el modelo matemático y el porcentaje de área forestal quemada con una distribución de sensores aleatoria. Para la prueba de normalidad de Anderson Darling se obtuvo que los Valores P son menores que 0.05, por lo que se puede afirmar estadísticamente que estas variables no siguen una distribución normal.

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \sigma_1 / \sigma_2 = 1$
 Hipótesis alterna $H_1: \sigma_1 / \sigma_2 \neq 1$
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Método de prueba	Estadística		Valor p
	GL1	GL2	
Bonett	1,69	1	0,194
Levene	4,21	1 198	0,042

Fig. 23. Resultados de prueba de dos varianzas para porcentaje de área forestal quemada hasta detección.

En la prueba de dos varianzas se debe tener en cuenta nuevamente el resultado de la prueba de Levene, o sea 0.042 que es menor que el nivel de significancia 0,05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se puede afirmar que las varianzas del t porcentaje de área forestal quemada con el modelo matemático y con distribución aleatoria de los sensores son diferentes.

Prueba

Hipótesis nula: $\text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Model}) - \text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Distr}) \geq 0$
 Hipótesis alterna: $\text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Model}) - \text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Distr}) < 0$
 Nivel de significancia: 0,05
GL Valor T Valor p
 187 -3,2093 0,001

Valor $p \leq 0,05$. Se puede afirmar que $\text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Model}) < \text{Media}(\text{Área Forestal Quemada con Distr})$.

Fig. 24. Resultados de prueba de equivalencia para porcentaje de área forestal quemada hasta detección.

La prueba de equivalencia entre dos muestras arrojó como resultado un Valor P de 0.001, menor que el nivel de significancia, por lo que se puede afirmar que el promedio del porcentaje de área forestal quemada con modelo matemático es menor que el del área forestal quemada con los sensores distribuidos de manera aleatoria. Además, se puede apreciar en la Fig. 25 como los tres primeros cuartiles del área forestal quemada teniendo en cuenta el modelo matemático están agrupados hacia la izquierda.

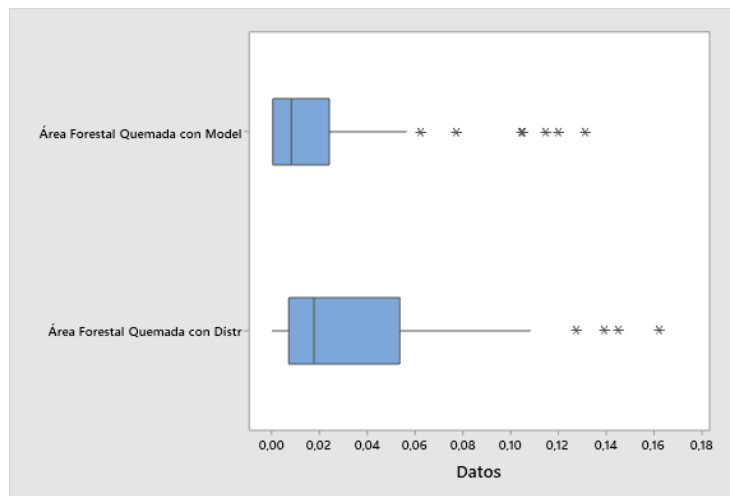


Fig. 25. Diagrama de cajas de prueba de equivalencia para porcentaje de área forestal quemada hasta detección.

Finalmente, se comparan los resultados de los KPI's entre la actualidad y después del modelo de optimización (TABLA XIX). Para el promedio del tiempo de detección de incendio, inicialmente se tenía un valor de 2,8641 épocas, menor al resultado que se obtuvo con el modelo. Esta variación se puede explicar porque inicialmente, el valor estimado se obtuvo de una simulación con solo una réplica, en la que el incendio pudo durar poco, mientras que en esta etapa se tomaron en cuenta 100 repeticiones para generar los escenarios aleatorios y ejecutar el modelo. Para el área forestal quemada hasta detección, se obtuvo una reducción significativa, al igual que con el tiempo de ejecución del estudio.

En la siguiente tabla, se consolida la variación de los indicadores tiempo promedio hasta detección y % promedio de área quemada hasta detección, esta comparación se hizo versus los resultados de los escenarios aleatorios (ANEXO 11).

TABLA XVIII.
 VARIACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Variación
Tiempo promedio hasta detección	-43,48%
% promedio de área quemada	-43,30%

Con estos resultados, se puede concluir que, el modelo propuesto puede cumplir con las restricciones de diseño y mejora los indicadores de desempeño.

TABLA XIX.
COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Variable	Actualidad	Optimizado
Tiempo de detección de incendio.	Media de 2,8641 épocas.	Media de 18,340 épocas.
Área forestal quemada	Media de 46,873% de área propensa a quemarse.	Media de 1.8713% de área propensa a quemarse.
Costo de implementación	Aproximadamente USD 548 363,75 solo en hardware.	USD 1043,05 - USD 3129,15.
Tiempo de ejecución del estudio	El tiempo de procesamiento es de 10 veces el tiempo de simulación (en minutos). En concreto simular 1 hora, tomará 10 horas en ser simuladas.	6,63 segundos en promedio

VI. VERIFICAR

A. Medición de los impactos

Análisis del impacto financiero

Se procedió a calcular los costos ahorrados con los resultados obtenidos. Para evaluar el impacto de la solución, se compararon los resultados del diseño propuesto con la situación inicial. En la siguiente tabla, se describe el concepto del costo y el cálculo correspondiente al número de sensores requeridos para el área del APFFLP.

TABLA XX.
RESUMEN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Parte	Concepto Hardware	Referencia	Fuente	Precio unidad USD*	Cantidad*	Precio total USD
Nodo sensor	Sensor digital temperatura	<i>Sensirion</i> SHT75	[24]	USD 38,62	4270	USD 164.907,40
	Unidad de procesamiento	Texas Microcontrolador MSP430	[25]	USD 11,94	4270	USD 50.983,80
	Módulo transceptor	Texas Transceptor CC1101	[26]	USD 4,89	4270	USD 20.880,30
	Fuente de poder	Batería de litio 600mA	[27]	USD 7,95	4270	USD 33.946,50
Nodo central	Unidad de procesamiento	Microcontrolador PIC24FJ256GB110	[28]	USD 5,03	1068	USD 5.372,04
	Módulo transceptor	<i>Laird Tech.</i> Transceptor AC4868-250	[29]	USD 110,18	1068	USD 117.672,24
	Fuente de poder	Panel solar pequeño genérico	[30]	USD 30,00	1068	USD 32.040,00
					Total	USD 425.802,28

Para conocer el porcentaje de mejora del costo total, se calcula la variación porcentual de cada situación.

$$\text{Variación porcentual} = \left(\frac{\text{Costo total actual}}{\text{Costo total anterior}} - 1 \right) \times 100 \quad (9)$$

Aunque no se cumplió con la meta establecida de reducir los costos a la mitad, sí se presenta una mejora en este indicador.

TABLA XXI.
COMPARACIÓN DE COSTOS

	Costo sensores	Porcentaje variación
Antes	USD 548.363,75	-22,35%
Ahora	USD 425.802,28	

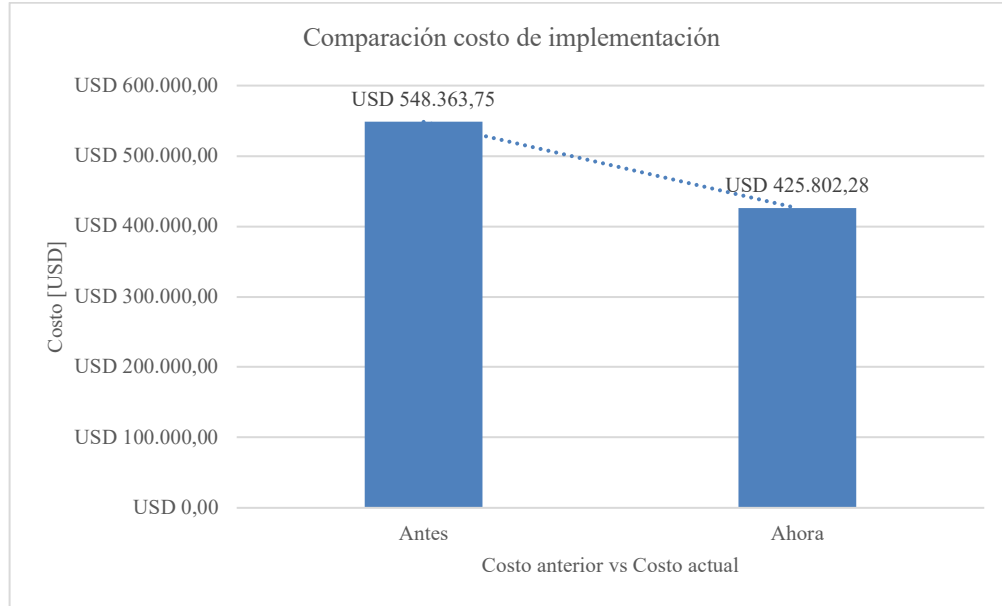


Fig. 27. Gráfico resumen de los costos de implementación.

Seguido a lo anterior, se calculó el indicador *ROI* (Retorno sobre Inversión), teniendo en cuenta que la inversión correspondería a la adquisición de la licencia del solucionador Gurobi, que, aunque la licencia pueda ser otorgada de forma gratuita y para fines académicos, es el único costo hipotético que podría tener la implementación de la solución. El ahorro correspondería a diferencia entre el costo de implementación anterior menos el costo actual, pues se logró reducir y representa un ahorro.

El indicador Retorno sobre Inversión se calcula con la siguiente ecuación:

$$ROI = \frac{Ahorro}{Inversión} \quad (10)$$

El precio de la licencia Gurobi se estableció en 10 000 USD [52].

También, se asume un costo de capital que es el rendimiento mínimo que este proyecto requeriría, se estableció un valor mínimo del 10%. En la siguiente tabla se resumen los valores.

TABLA XXII.
CÁLCULO DEL ROI

Inversión	USD 10 000,00
Ahorro	USD 122.561,47
ROI	12,26

Con un ROI de 12,26 y un costo de capital del 10%, se puede concluir que este proyecto es viable, pues el retorno sobre la inversión es mayor al costo del capital.

Análisis del impacto ambiental

Para este análisis, se estimaron los indicadores pérdida de biomasa y emisiones de GEI. Para estimar las emisiones de los compuestos, se utilizaron factores de emisión publicados en Portugal.

TABLA XXIII.
FACTORES DE EMISIÓN [54]

Compuesto	t/t biomasa seca
CO ₂	1,377
CH ₄	0,0014
N ₂ O	0,00012

Para la estimación de las emisiones de GEIs se utilizó la siguiente ecuación.

$$Ex = A * B * FC * FEx \quad (11) [53]$$

En donde,

Ex = toneladas de gas (CO₂, CH₄, N₂O)

A = área quemada en hectáreas

B = biomasa previa al fuego en toneladas

FC = fracción consumida en porcentaje (función de la severidad y vegetación) (TABLA XXII)

FEx= Factores de emisión de un dado en toneladas de gas liberado por tonelada de biomasa consumida (TABLA XXIII).

La fracción consumida en porcentaje se aprecia en la siguiente tabla.

TABLA XXIV.
PORCENTAJES DE CONSUMO DE BIOMASA POR CLASE DE SEVERIDAD Y TIPO DE VEGETACIÓN [53]

Clase de severidad	Porcentaje de biomasa consumida		
	Matorral	Coníferas	Fronosas
Baja	0,71	0,25	0,25
Media	0,84	0,47	0,40
Alta	0,89	0,56	0,48
Muy alta	0,95	0,65	0,56

El área quemada en hectáreas se toma en cuenta solo hasta detección, pues no es posible estimarla teniendo en cuenta los tiempos de respuesta para la atención de los incendios que son variables, así como la duración total del incendio.

Según la clasificación de Rzedowski [54] la vegetación dominante en el área está compuesta por cuatro tipos, de los cuales en este trabajo son de interés, por su afectación los bosques puros o mezclados que presentan *Quercus* y *Pinus*. En el estrato arbóreo, las principales especies son: los robles de hoja ancha *Quercus resinosa*, *Q. coccolobifolia*, *Q. obtusata*, *Q. rugosa* y *Q. magnolifolia*, entre otros. Entre los encinos de hoja angosta se pueden citar: *Quercus castanea*, *Q. viminea* y *Q. gentryi* (Reyna, 2004).

Para efectos de simplificación, se seleccionó una sola especie para hacer el análisis de emisiones. De acuerdo con los datos de Castañeda, Gallegos, Sánchez y Domínguez [55], la biomasa del *Pinus oocarpa* estimada solo para la parte aérea (fuste, ramas y hojas), y esta se calculó en 40.4 T/ha. Esta especie corresponde al tipo de vegetación conífera.

Una vez calculadas las emisiones, se normalizaron a toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Esta es la unidad de medida utilizada para indicar el potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero (*Global Warming Potential, GWP*).

$$CO_2eq = Ex * GWP \quad (12)$$

Donde,

CO₂eq = dióxido de carbono equivalente en toneladas

Ex = valor en toneladas de la emisión por tipo de gas

GWP = potencial de calentamiento global (adimensional)

TABLA XXV.
ÍNDICE DE POTENCIAL DEL CALENTAMIENTO GLOBAL [56]

GEI	GWP por 100 años
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	298

En las siguientes figuras, se puede observar la comparación de resultados de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O. Además, se muestra el porcentaje de variación. Como es notable, la variación alcanza picos altos en algunas iteraciones, sin embargo, en la mayoría de estas la variación es negativa indicando que efectivamente se puede reducir las emisiones al resultar un incendio. El comportamiento errático del porcentaje de área quemada se debe a que proviene de datos aleatorios, los puntos de inicio en cada iteración pueden aparecer en diferentes puntos.

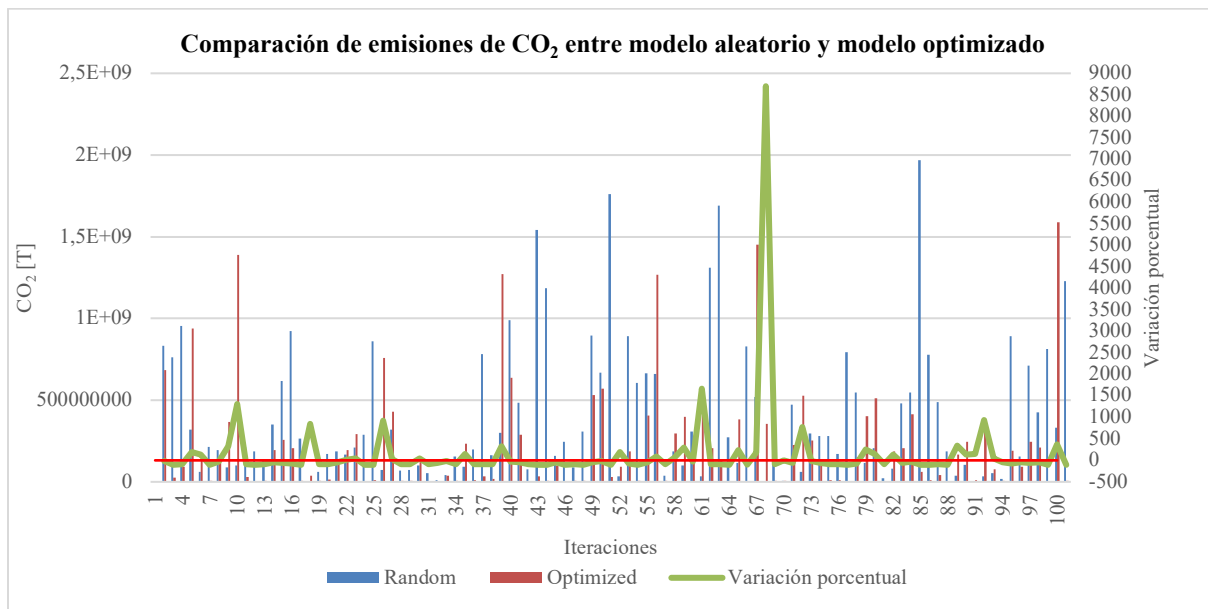


Fig. 28. Gráfico de comparación de emisiones de CO₂.

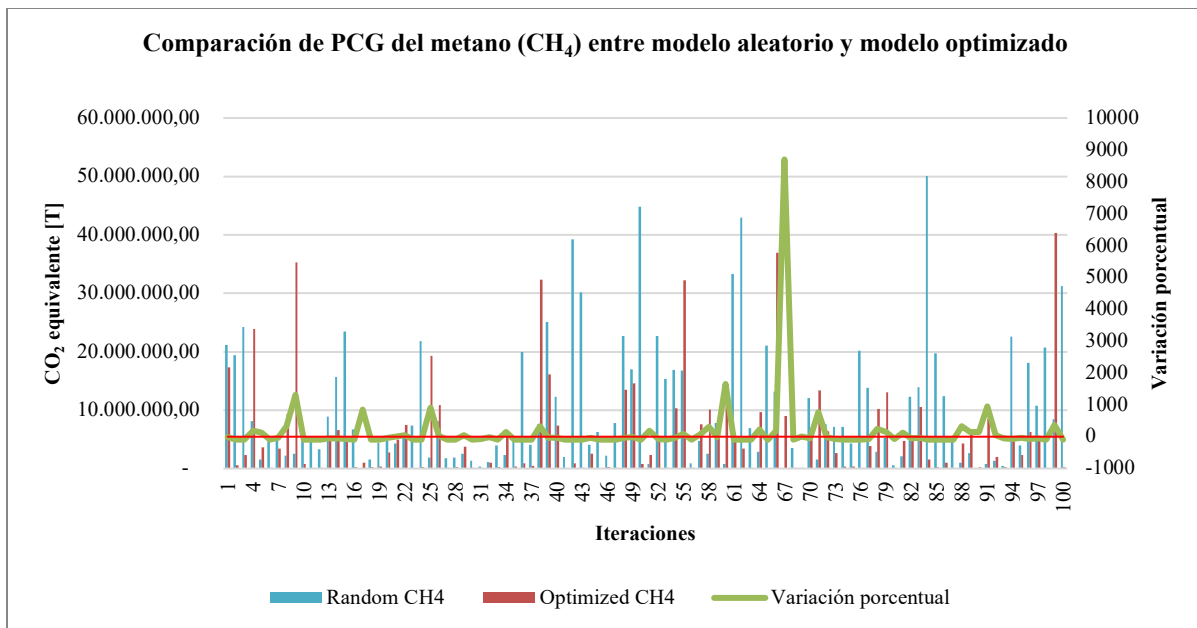


Fig. 29. Gráfico de comparación de CO₂ equivalente de las emisiones de metano.

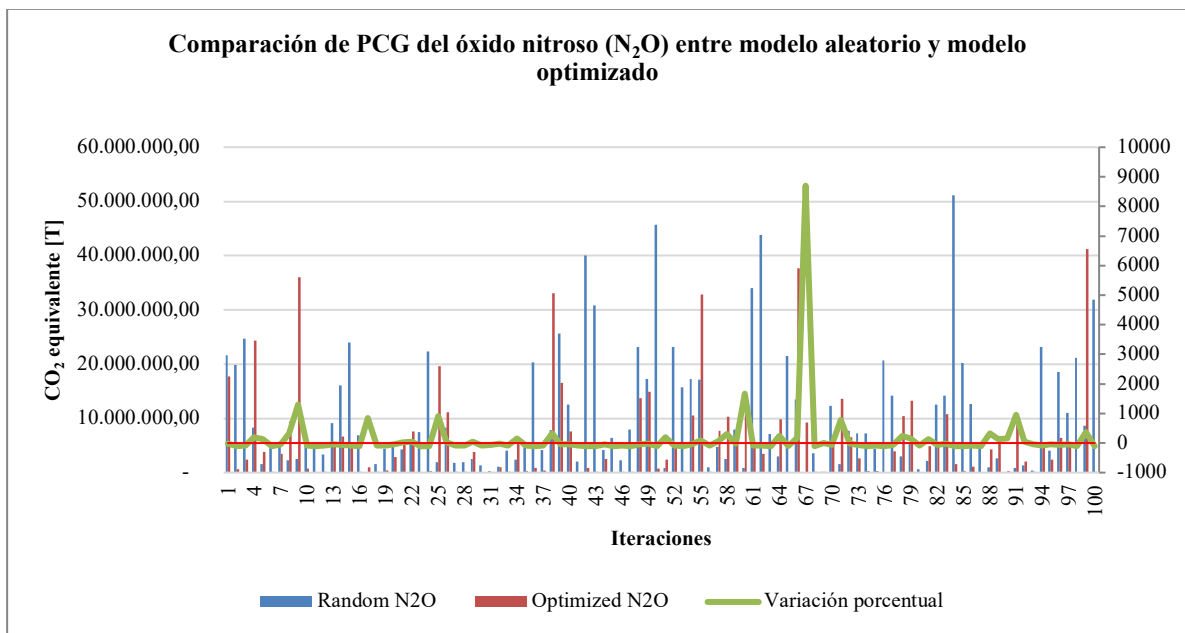


Fig. 30. Gráfico de comparación de CO₂ equivalente de las emisiones de óxido nítrico.

B. Estandarización de la solución

Teniendo en cuenta que el modelo de optimización lineal puede ser adaptado para aplicarse en diferentes áreas, se decidió crear el Manual para la Optimización de la Localización de una Red de Sensores de Detección Temprana de Incendios Forestales (ANEXO 16), con el fin de tener un proceso estandarizado. En este se detallan las acciones que se deben realizar para implementar este modelo.

C. Conclusiones

Este proyecto abordó el problema de *Localización de Máxima Cobertura* y presentó una solución aplicada a un caso real, como lo es la implementación de un sistema de detección temprano en el APFFLP. Como característica estocástica, se consideró la probabilidad de incendio, la metodología que se siguió fue de Modelación Estocástica, teniendo como resultado un modelo de programación lineal basado en escenarios. Esta alternativa permitiría mejorar los indicadores de desempeño: en comparación con los escenarios de ubicación aleatoria, la media del tiempo hasta detección presentó una mejoría del 43,48%, de igual forma, la media del % del área quemada hasta detección también presentó una mejoría del 43,30%. La solución propuesta representa una importante reducción en el tiempo de ejecución, valor agregado para el grupo de investigación, pues inicialmente la simulación tomaba 1 hora en ejecutarse por hora simulada, ahora, en promedio la ejecución de modelo toma 6,63 segundos. Finalmente, se logró mejorar el indicador costo de implementación con una reducción del 22,25%, aproximadamente 425.802,28 USD correspondería al costo de únicamente el hardware. Este costo podría reducirse aún más considerando que los sensores están siendo desarrollados por el equipo de investigación.

Tanto para evaluar los resultados del modelo, como para generar escenarios que conduzcan a la optimización, se propone un modelo de Simulación de Montecarlo que emula la propagación de fuego a partir de un conato. El modelo de simulación es genérico y puede ser alimentado, en su versión inicial, a partir de información obtenida de fotografías aéreas en un proceso que puede ser enriquecido con modelos más avanzados de inteligencia artificial. Los datos utilizados para desarrollar el modelo y probarlo en el solucionador de Gurobi son genéricos, y fueron generados mediante la simulación con valores estimados a partir de secciones del área geográfica del APFFLP. Como se extrajeron los píxeles de una captura de imagen, el tamaño de esta medida hace que el modelo se extienda, por eso, se procedió a recortar la imagen de acuerdo con el tamaño de la cuadrícula dado.

Se garantizó que el diseño cumpliera con los requerimientos de desempeño, mediante la validación y análisis matemático sujeto a las restricciones del modelo de programación lineal en el software Julia. Además, esto permitió cumplir con el objetivo de reducir el costo de implementación, pues Julia es un software de uso gratuito. Igualmente, el solucionador Gurobi permite una licencia gratuita por un tiempo limitado.

Por otro lado, la solución presentada permitiría la mejora en la calidad del aire de las comunidades aledañas, gracias a la reducción de gases como el dióxido de carbono, metano y óxido nitroso que son expulsados al ambiente por el consumo de la biomasa durante los incendios. Se evaluó en el impacto ambiental que efectivamente la solución presentada permite en la mayoría de los casos (iteraciones) reducir las emisiones. Pues con la reducción del tiempo hasta detección se puede lograr una disminución del tiempo de reacción de los organismos de socorro, lo que permite reducir el área quemada, además de la preservación de la integridad física de las personas mediante la evacuación de zonas en peligro. Asimismo, se permite la preservación de especies vegetales y animales nativas de la zona, gracias a la detección oportuna que reducirá el impacto sobre estas.

A pesar de los esfuerzos por diseñar un sistema de detección temprana de incendios, cabe aclarar que finalmente el impacto de estos depende en mayor proporción de la respuesta posterior, pues una vez detectados, se alerta al cuerpo de bomberos y al equipo de respuesta. Asimismo, es de suma importancia reforzar la prevención de los incendios, pues como se expresó anteriormente, en mayor parte son causados por la acción humana.

Finalmente se concluye que el proyecto cumplió los objetivos establecidos inicialmente ya que presenta una metodología sencilla y fácil de implementar para el grupo de interés. También muestra un gran potencial para ampliar su alcance y mejorar los resultados obtenidos mediante la posibilidad de ampliar las características estocásticas.

D. Recomendaciones

- Se recomienda para una futura investigación, explorar e incorporar más factores estocásticos como el impacto del viento, temperatura o la humedad. Cabe resaltar que, por la naturaleza del modelo, estos serían de fácil implementación en la construcción del modelo de simulación.

- Para una implementación más completa, la posterior integración con el trabajo del equipo en Guadalajara, México sería ideal, pues permitiría ajustar el modelo aún más con base en sus criterios y especificaciones.
- Para una implementación más práctica, se podría hacer uso de algoritmos aproximados como las metaheurísticas para evaluar el problema más rápido considerando áreas más extensas. También, se podrían hacer transformaciones de la imagen que consoliden pixeles vecinos (cuando se simula a partir de imágenes o información histórica) para hacer el enfoque más eficiente.
- A pesar de que la metodología implementada tuvo resultados favorables y cumplió con los indicadores de desempeño establecidos, se recomienda utilizar esta metodología para áreas pequeñas, pues considerar un área de mucha extensión, aumentaría el tiempo computacional.
- Para la implementación de la metodología se recomienda la utilización de un equipo con las mejores especificaciones posibles en cuanto a procesador y demás especificaciones técnicas, esto permitiría lograr una solución en un menor tiempo de ejecución.

VII. GLOSARIO

GEI: gases de efecto invernadero son compuestos que están presentes en la atmósfera en ciertas concentraciones y que contribuyen a aumentar la temperatura del planeta, debido a su capacidad para absorber y remitir la radiación infrarroja proveniente de la superficie terrestre [57].

Heurísticas: “son métodos que buscan buenas soluciones (cercanas al óptimo) a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad” [58].

Metaheurísticas: son métodos aproximados que guían y modifican otras heurísticas para crear nuevas soluciones de las que son normalmente generadas, evadiendo de esta manera posibles óptimos locales, transformando una solución en otra [59].

MODIS: o espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua). Terra MODIS y Aqua MODIS están viendo toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. Entre ellas algunas se encargan de analizar la temperatura de la superficie terrestre [60].

GIS: los sistemas de información geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés [*Geographic Information System*]) son herramientas que nos permiten integrar y relacionar todas esas grandes cantidades de datos, que tienen una referencia espacial, facilitando así la toma de decisiones de una manera más eficaz [61].

dBm: decibeles por milivatio, es una unidad que representa la potencia de transmisión absoluta, se utiliza en redes de radio, microondas, sensores, fibra óptica, entre otros.

NP-Hard: clasificación de complejidad para problemas difíciles de resolver.

Simulación de Montecarlo: El método de Monte Carlo es un método estadístico (no determinístico) que proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos, haciendo factible la realización de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico [62].

Potencial de Calentamiento Global: El Potencial de Calentamiento Global define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. De esta forma, se pueden tener en cuenta los efectos radiactivos de cada gas, así como sus diferentes periodos de permanencia en la atmósfera [63].

ROI: El Retorno sobre la Inversión es una razón que relaciona el ingreso generado por un centro de inversión a los recursos (o base de activos) usados para generar ese ingreso [64].

VI. REFERENCIAS

- [1] Yamilé González Sánchez, Yaima Fernández Díaz, and Tania Gutiérrez Soto, “El cambio climático y sus efectos en la salud,” *Rev. Cubana Hig. Epidemiol.*, vol. 51, Dec. 2013, [En línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223230955011>.
- [2] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, “Global temperature trend monitor.” <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-c3s-global-temperature-trend-monitor?tab=app> (accessed Mar. 20, 2021).
- [3] WWF and Boston Consulting Group, “Fires, Forests and the future: A crisis raging out of control?,” 2020. [En línea] Disponible en: www.swim2birds.co.uk.
- [4] FAO, “Forests and Climate Change.” <http://www.fao.org/3/ac836e/AC836E03.htm> (accessed Mar. 20, 2021).
- [5] California Fire Consortium, “Climate, wildfire, and management influences on forest carbon carrying capacity: Webinar — California Fire Science Consortium.” 2017, [En línea] Disponible en: <http://www.cafiresci.org/events-webinars-source/category/climate-wildfire-and-management-influences-on-forest-carbon-carrying-capacity-webinar>.
- [6] Francisco Huerta Martínez and José Luis Ibarra Montoya, “Incendios en el Bosque la Primavera: un acercamiento a sus posibles causas y consecuencias,” *CienciaUAT*, pp. 23–32, 2014, [En línea] Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v9n1/2007-7858-cuat-9-01-00023.pdf>.
- [7] N. Hernández-Hostaller, “Evaluación de tecnologías de sensores para la detección temprana de incendios forestales Current situation of construction materials management in Costa Rica,” *Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 4, pp. 123–138, 2016.
- [8] SEMADET, “PLAN DE MANEJO DEL FUEGO TERMINOS DE REFERENCIA PLAN DE MANEJO DEL FUEGO PARA EL ESTADO DE JALISCO TERMINOS DE REFERENCIA.”
- [9] R. Edward Freeman, *Strategic Management: A Stakeholder Approach*. Cambridge, 2010.
- [10] “Vista de La costumbre al envenenamiento: El caso de los contaminantes atmosféricos de la ciudad de Guadalajara, México.” <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/14020/19676> (accessed May 02, 2021).
- [11] C. De Diputados, D. H. Congreso De, L. A. Unión, and N. Ley, “LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE.”
- [12] SEMADET, “Controlan incendio forestal en Bosque La Primavera | Gobierno del Estado de Jalisco,” 2021.
- [13] Prensa Gob. Jalisco, “Reglamento Interior del Trabajo Heroico Cuerpo de Bomberos.” <https://www.bomberos.cdmx.gob.mx/dependencia/marco-normativo> (accessed May 02, 2021).
- [14] “¿Qué hacemos? | Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial.” <https://semadet.jalisco.gob.mx/acerca/que-hacemos> (accessed May 02, 2021).
- [15] Congreso de Estado de Jalisco, *LEY DE TRANSPARENCIA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA DEL ESTADO DE JALISCO Y SUS MUNICIPIOS*. Congreso de Estado de Jalisco, 2013.
- [16] “Gobierno de Jalisco presenta estrategia para defender al estado de los incendios forestales este año | Gobierno del Estado de Jalisco.” <https://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/121127> (accessed May 02, 2021).
- [17] Comisión Nacional Forestal, “Amigos de la conservación | Comisión Nacional Forestal | Gobierno | gob.mx.” <https://www.gob.mx/conafor/es/articulos/amigos-de-la-conservacion?idiom=es> (accessed May 02, 2021).
- [18] Comisión Nacional Forestal, “Reglas de operación del programa apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021,” 2020.
- [19] “COECYTJAL.” <http://www.coecytjal.org.mx/Plataforma/app/index.html#/inicio> (accessed May 02, 2021).

- [20] “SEMARNAT – CONANP.” <http://www.conabio.gob.mx/uicn/SEMARNATCONANP.html#:~:text=La Secretaría de Medio Ambiente,desarrollo sustentable en el país.> (accessed May 02, 2021).
- [21] C. De Diputados, D. H. Congreso De, L. A. Unión, and N. Ley, “LEY FEDERAL DE TRANSPARENCIA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA LEY FEDERAL DE TRANSPARENCIA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA "EL CONGRESO GENERAL DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS, DECRETA: SE ABROGA LA LEY FEDERAL DE TRANSPARENCIA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA GUBERNAMENTAL Y SE EXPIDE LA LEY FEDERAL DE TRANSPARENCIA Y ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA.”
- [22] A. Molina-Pico, D. Cuesta-Frau, A. Araujo, J. Alejandre, and A. Rozas, “Forest Monitoring and Wildland Early Fire Detection by a Hierarchical Wireless Sensor Network,” 2016, [En línea] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8325845>.
- [23] J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, and S. Sendra, “A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification,” *Sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 8722–8747, 2009.
- [24] Octopart, “SHT75 Sensirion - Temperature and Humidity Sensors - Distributors, Price Comparison, and Datasheets | Octopart component search.” <https://octopart.com/sht75-sensirion-909522> (accessed May 30, 2021).
- [25] M. Electronics, “Texas Instruments Microcontroladores de 16 bits - MCU – Mouser Colombia.” https://co.mouser.com/Search/Refine?Ntk=P_MarCom&Ntt=187598723 (accessed May 30, 2021).
- [26] Mouser Electronics, “Texas Instruments CC1101 Serie Transceptor de RF – Mouser Colombia.” https://co.mouser.com/Texas-Instruments/Semiconductors/Wireless-RF-Integrated-Circuits/RF-Transceiver/CC1101-Series/_/N-3ri0r?P=1yykwrFZ1z0zls6 (accessed May 30, 2021).
- [27] Electromaker, “Lithium Ion Polymer Battery - ASR00008.” <https://www.electromaker.io/shop/product/lithium-ion-polymer-battery> (accessed May 30, 2021).
- [28] MicroChip, “PIC24FJ256GB110 - 16-Bit - Microcontrollers and Digital Signal Controllers.” <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ256GB110> (accessed May 30, 2021).
- [29] ATC, “AC4868-250M - ATCKIT.” <https://atckit.com/rfif-and-rfid/rf-transceiver-modules/AC4868-250M/AC4868-250M.html> (accessed May 30, 2021).
- [30] Made-in-china, “Solar cell price, 2021 solar cell price Manufacturers & Suppliers | Made-in-China.com.” https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/solar_cell_price.html (accessed May 30, 2021).
- [31] M. Geóg María Isabel Cruz López, “Sistema de alerta temprana de incendios forestales.”
- [32] Comisión Nacional Forestal, “Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores.” Zapopan, Jalisco, 2010.
- [33] A. Amaya G. Ciro, H. S. Hernández, J. Sampayo O. Ernesto, and F., “Problema de Máxima Cobertura Aplicado a Centros de Atención en Salud: Aproximación Mediante Algoritmos Genéticos.,” *Semilleros*, vol. IV, no. 01, pp. 1–13, 2017.
- [34] N. Gupta, N. Kumar, and S. Jain, “Coverage problem in wireless sensor networks: A survey,” in *International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, SCOPES 2016 - Proceedings*, Jun. 2017, pp. 1742–1749.
- [35] J. H. Seok, J. Y. Lee, W. Kim, and J. J. Lee, “A bipopulation-based evolutionary algorithm for solving full area coverage problems,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 12, pp. 4796–4807, 2013.
- [36] Comisión Nacional de Áreas Naturales and Protegidas, “Programa De Manejo Area De Proteccion De Flora Y Fauna La Primavera,” vol. 1. p. 132, 2000, [En línea] Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/primavera.pdf.
- [37] M. Cattani, C. A. Boano, and K. Römer, “An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication,” *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 6, no. 2, 2017.

- [38] D. Moncada, “Atenuación por lluvia en un sistema de comunicación estación-satélite,” *Télématique Rev. Electrónica Estud. Telemáticos*, vol. 7, no. 1, pp. 29–40, 2008.
- [39] H. S. Ramos, A. Boukerche, A. L. C. Oliveira, A. C. Frery, E. M. R. Oliveira, and A. A. F. Loureiro, “On the deployment of large-scale wireless sensor networks considering the energy hole problem,” *Comput. Networks*, vol. 110, pp. 154–167, 2016.
- [40] J. S. Isidro, “Proceso de Validación de Modelos de Simulación,” *Inf. Técnicos Ciemat*, 1998.
- [41] Q. Yang, S. He, J. Li, J. Chen, and Y. Sun, “Energy-efficient probabilistic area coverage in wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 367–377, Jan. 2015.
- [42] D. Chauhan, A. Unnikrishnan, and M. Figliozzi, “Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 99, pp. 1–18, Feb. 2019.
- [43] C. Ozturk, D. Karaboga, and B. Gorkemli, “Probabilistic dynamic deployment of wireless sensor networks by artificial bee colony algorithm,” *Sensors*, vol. 11, no. 6, pp. 6056–6065, Jun. 2011.
- [44] J. Ai and A. A. Abouzeid, “Coverage by directional sensors in randomly deployed wireless sensor networks,” *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 11, no. 1. Springer, pp. 21–41, Feb. 2006, [En línea] Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10878-006-5975-x>.
- [45] F. Carrabs, R. Cerulli, C. D’Ambrosio, and A. Raiconi, “Maximizing Lifetime for a Zone Monitoring Problem Through Reduction to Target Coverage,” no. August 2019, pp. 111–119, 2018.
- [46] F. Castaño, A. Rossi, M. Sevaux, and N. Velasco, “An exact approach to extend network lifetime in a general class of wireless sensor networks,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 433–434, pp. 274–291, 2018.
- [47] A. Daoudi, Y. Kerfi, I. Benelallam, and E. H. Bouyakhf, “A constraint programming approach for coverage optimization problem in WSN,” *2nd Int. Conf. Innov. Comput. Technol. INTECH 2012*, pp. 123–127, 2012.
- [48] E. Puente, M. Lázaro, O. Abreu, J. A. Capote, and D. Alvear, “Aplicación de un algoritmo evolutivo para la optimización del modelado computacional de la pirólisis de materiales,” *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, vol. 29, no. 4, pp. 208–214, 2013, [En línea] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2013.07.003>.
- [49] R. Martí, “Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria,” Valencia, 2003.
- [50] “LocalSolver: Home.” <https://www.localsolver.com/> (accessed Jun. 07, 2021).
- [51] E. J. Jardel Pélaez, “Los incendios en el Bosque La Primavera: entender el problema para resolverlo,” *Informador.mx*, Apr. 18, 2021. <https://www.informador.mx/ideas/Los-incendios-en-el-Bosque-La-Primavera-entender-el-problema-para-resolverlo-20210418-0028.html> (accessed Oct. 22, 2021).
- [52] AMPL, “Standard Price List - Gurobi.” <https://ampl.com/products/standard-price-list/> (accessed Nov. 22, 2021).
- [53] C. Vega-García, “Estimación de emisiones de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España,” *Inst. Ecol. A.C.*, vol. 25, no. 2, 2019, [En línea] Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/617/61762610002/html/>.
- [54] J. Rzedowski and L. Huerta, *Vegetación de México*, 1st ed. CONABIO, 2006.
- [55] R. Ximhai, J. Carlos Castañeda-González, A. Gallegos-Rodríguez, M. Sánchez-Durán, and P. Antonio Domínguez-Calleros, “Biomasa aérea y posibles emisiones de CO_2 después de un incendio; caso del bosque ‘la primavera,’” 2012.
- [56] IPCC, “Resumen Técnico Expertos sobre el Cambio Climático.” [En línea] Disponible en: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>.
- [57] SIAC, “GEI - IDEAM.” <http://www.siac.gov.co/climaticogei> (accessed Nov. 22, 2021).
- [58] C. K. Y. Lin, “Resources Requirement and Routing in Courier Service,” *Veh. Routing Probl.*, Sep. 2008, [En línea]

Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/4583>.

- [59] T. Caric and H. Gold, “Vehicle Routing Problem,” 2008, [En línea] Disponible en: www.in-teh.org.
- [60] “MODIS Web.” <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/> (accessed Nov. 22, 2021).
- [61] “¿Que son los Sistemas de Información Geográfica – GIS o SIG?” <https://www.cic.es/que-es-gis/> (accessed Nov. 22, 2021).
- [62] “CAPÍTULO 2 EL MÉTODO DE MONTE CARLO Y EL PROGRAMA DE CÓMPUTO MCNPX.”
- [63] “Glosario: Potencial de calentamiento global:” <https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/potencial-calentamiento-global.htm> (accessed Nov. 22, 2021).
- [64] C. F. CUEVAS VILLEGAS, “MEDICIÓN DEL DESEMPEÑO: RETORNO SOBRE INVERSIÓN, ROI; INGRESO RESIDUAL, IR; VALOR ECONÓMICO AGREGADO, EVA; ANÁLISIS COMPARADO,” *Estud. Gerenciales*, vol. 17, no. 79, pp. 13–22, 2001, [En línea] Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-59232001000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=es.

TABLA XXVI.
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word...)
1	2021 104 - Anexo 1. Hoja de trabajo grupos de interés corregida.	Propio	Word
2	2021 104 - Anexo 2. Hoja de identificación de requerimientos.	Propio	Word
3	2021 104 - Anexo 3. Plan de recolección de datos (PRD).	Propio	Excel
4	2021 104 - Anexo 4. Preliminar simulación bosque.	Propio	jl (Julia)
5	2021 104 - Anexo 5. Tabla 1 Resultados simulación incendios.	Propio	Word
6	2021 104 – Anexo 6. Diagrama de flujo situación actual.	Propio	PDF
7	2021 104 - Anexo 7. Resumen de Revisión de Literatura	Propio	Word
8	2021 104 - Anexo 8. Análisis Jerárquico AHP	Propio	Excel
9	2021 104 - Anexo 9. Project del Plan de trabajo	Propio	PDF
10	2021 104 - Anexo 10. Project Charter	Propio	Excel
11	2021 104 – Anexo 11. Datos simulaciones	Propio	Excel
12	2021 104 – Anexo 12. Análisis estadístico	Propio	Word
13	2021 104 – Anexo 13. Modelo final	Propio	ipynb
14	2021 104 – Anexo 14. Generador mapa de bits	Propio	ipynb
15	2021 104 – Anexo 15. Análisis ambiental	Propio	Excel

16	2021 104 – Anexo 16. Manual para la optimización de la localización de sensores detección temprana de incendios forestales	Propio	PDF
----	--	--------	-----