

**UNIVERSIDAD NACIONAL**  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
**ESCUELA DE INFORMÁTICA**



**“Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS)”**

Para optar al grado de Licenciado en Informática  
con énfasis en Diseño web

Ing. Michael Alejandro González López

503810012

Heredia, Costa Rica

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto de graduación a Dios y a mi familia, quienes siempre fueron mi apoyo y motivación a lo largo de este camino.

## **Reconocimientos y agradecimientos**

Le agradezco a Dios por dejarme concluir esta etapa tan importante en mi vida y brindarme el conocimiento suficiente para desarrollarme profesionalmente.

Agradezco a mis padres, Alejandro González Rojas y Sobeida López Víctor, por su apoyo, consejos y los buenos valores que han sido fundamentales para mi crecimiento personal y profesional.

A mi hermano Johan y mi hermana Alejandra, que siempre me han brindado sus palabras de aliento y siempre serán mi motivación.

A mi novia Karen Monge Matamoros por acompañarme y tenerme paciencia a lo largo de este camino y siempre estar pendiente de mi rendimiento académico, sin duda un apoyo muy importante para poder culminar este proyecto.

A José Miguel Gesumaría Paladino, Gerente de operaciones de Navegación Satelital, sin su confianza y guía no podría haber aportado este proyecto al Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Le agradezco de corazón a mi tutor Carlos L. Chanto Espinoza, por brindarme su apoyo y soporte en cada etapa de este proyecto. Y siempre estar ahí para recordarme que podía culminar el proyecto con éxito.

Finalmente agradezco a todas las personas que con una palabra o gesto siempre estuvieron ahí para impulsarme y ayudarme a concluir este proyecto con éxito.

Michael Alejandro González López

## **Resumen del proyecto**

El Instituto Costarricense de Ferrocarriles por sus siglas INCOFER en conjunto con Navegación Satelital de Costa Rica por sus siglas NAVSAT, propusieron desarrollar un sistema de detección temprana de accidentes, en donde se pudieran alertar posibles colisiones entre trenes.

Sin embargo, el desarrollo de este sistema conlleva implementar un algoritmo, que permita a partir de los datos obtenidos por los dispositivos GPS, detectar los distintos escenarios que se puedan presentar en la vía ferroviaria.

Por lo tanto, por medio del siguiente proyecto se propone desarrollar un algoritmo de ramificación y poda que ayude a detectar estos escenarios. Para una posterior instalación en el sistema encargado de generar las alertas.

Una vez desarrollado el algoritmo, la propuesta fue evaluada por medio de la ejecución de un piloto, el cual inició el 18 de junio del 2019 y finalizó el 16 de septiembre del 2019.

En este piloto se evaluaron los distintos eventos generados por los dispositivos GPS instalados en los trenes apolo.

El 16 de septiembre el algoritmo se da por desarrollado y se entrega para su posterior uso o sea integrado a un sistema de alertas y cumplir su finalidad.

## Palabras Claves

**GPS:** Tecnología de posicionamiento global. Es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de cualquier objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los EE. UU. Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de 3 o más satélites y utiliza la trilateración. En la práctica, normalmente son necesarios 4 o más satélites para determinar la posición con cierta precisión. (GPS - Tecnologías de la comunicación, s. f.).

**Algoritmo:** Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite hacer un cálculo y hallar la solución de un tipo de problemas. (Piperlab, s. f.).

**Trenes Apolo:** Es un modelo de vehículo automotor español de vía estrecha compuesta por dos subseries de unidades diésel que prestan servicio de transporte de pasajeros en el norte España, Costa Rica y Argentina. (colaboradores de Wikipedia, 2020).

**Geocerca:** Una geocerca es una valla o perímetro virtual alrededor de una ubicación física. Al igual que una cerca real, crea una separación entre la ubicación y el área que la rodea. A diferencia de una cerca real, también puede detectar el movimiento dentro de la zona cercada. (Que es una Geocerca | Verizon Connect México, s. f.).

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
1.1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.2. ANTECEDENTES.....	10
1.3. PROBLEMÁTICA.....	13
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.5. OBJETIVOS.....	18
<i>Objetivo General</i> .....	18
<i>Objetivos Específicos</i> .....	18
1.6. ALCANCE.....	19
1.7. LIMITACIONES.....	20
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>21</b>
2.1. MARCO REFERENCIAL.....	21
2.1.1. <i>Historia del Instituto Costarricense de Ferrocarriles</i> .....	21
2.1.2. <i>Misión</i> .....	22
2.1.3. <i>Visión</i> .....	22
2.1.4. <i>Valores</i> .....	22
2.1.5. <i>Estructura Organizacional</i> .....	23
2.1.6. <i>Trenes Apolo</i> .....	24
2.1.7. <i>Estudios Internacionales</i> .....	25
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	28
2.2.1. <i>Transporte En Tren</i> .....	28
2.2.2. <i>Tecnología aplicada al Tren</i> .....	29
2.2.3. <i>Actualidad del Tren</i> .....	31
2.2.4. <i>Accidentes del Tren</i> .....	32
2.2.5. <i>Historia del Manejo de emergencias</i> .....	36
2.2.6. <i>Software</i> .....	38
2.2.7. <i>Algoritmo de ramificación y poda</i> .....	42
2.3. MARCO METODOLÓGICO.....	46
<b>CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO</b> .....	<b>49</b>
3.1. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD.....	49
3.1.1. <i>Factibilidad Técnica</i> .....	51
3.1.2. <i>Factibilidad Económica</i> .....	51
3.2. FASE DE MODELADO.....	53
3.3. FASE DE DESARROLLO.....	54
3.3.1 <i>Elementos de entrada</i> .....	54
3.4. FASE DE DESPLIEGUE.....	60
3.5. FASE DE CONTROL.....	60
3.6. FASE DE ANÁLISIS.....	60
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS RETROSPECTIVO</b> .....	<b>62</b>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>64</b>
5.1. CONCLUSIONES.....	64

5.2. RECOMENDACIONES.....	66
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>72</b>
A. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO.....	72
B. CARTA DEL TUTOR .....	73
C. CARTA DE LA EMPRESA PATROCINADORA .....	74
D. ACTA DE APROBACIÓN DE REQUERIMIENTOS.....	75
E. ACTA DE APROBACIÓN DE CONSTRUCCIÓN.....	76
F. ACTA DE ACEPTACIÓN DE PRUEBAS.....	77
G. ACTA DE EJECUCIÓN DEL PILOTO.....	78
H. ACTA DE FINALIZACIÓN DEL PILOTO.....	79
I. ACTA DE CIERRE DEL PROYECTO .....	80
J. INFORME DE PRUEBAS.....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla no.1:</b> Estadísticas anuales 2018 INCOFER.....	<b>12</b>
<b>Tabla no.2:</b> Zonas de cobertura del servicio ferroviario.....	<b>13</b>
<b>Tabla no.3:</b> ¿Que es un algoritmo?.....	<b>40</b>
<b>Tabla no.4:</b> Actividades para ejecutar .....	<b>49</b>
<b>Tabla no.5:</b> Tabla de recursos.....	<b>51</b>
<b>Tabla no.6:</b> Tabla costo de recursos .....	<b>52</b>
<b>Tabla no.7:</b> Tabla costo de instalación del dispositivo GPS.....	<b>53</b>
<b>Tabla no.8:</b> Tabla de actividades .....	<b>53</b>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico no.1:</b> Organigrama Instituto Costarricense de Ferrocarriles .....	<b>23</b>
---	-----------

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura no.1:</b> Red de transporte ferroviario costarricense .....	11
<b>Figura no.2:</b> Servicio del tren se suspenderá en semana santa .....	13
<b>Figura no.3:</b> Nuevos trenes Apolo.....	24
<b>Figura no.4:</b> Locomotora 51 .....	32
<b>Figura no.5:</b> Choque frontal en pavas .....	33
<b>Figura no.6:</b> Choque en mismo sentido.....	34
<b>Figura no.7:</b> Choque frontal en santo domingo.....	35
<b>Figura no.8:</b> Centro de control ferroviario .....	36
<b>Figura no.9:</b> Diario extra-choque de trenes deja 10 muertos .....	37
<b>Figura no.10:</b> ¿Que es un algoritmo? .....	41
<b>Figura no.11:</b> Código fuente de: filtración y verificación de choque.....	54
<b>Figura no.12:</b> Visualización de segmentos, geocercas .....	55
<b>Figura no.13:</b> Visualización de trenes mismo sentido.....	59
<b>Figura no.14:</b> Visualización de trenes choque frontal.....	61
<b>Figura no.15:</b> Visualización de trenes mismo sentido.....	61

## **Capítulo 1. Introducción**

### **1.1. Introducción**

El proyecto consiste en crear un algoritmo capaz de detectar posibles situaciones que ocasionen accidentes entre los trenes apolo del Instituto Costarricense de Ferrocarriles por sus siglas INCOFER.

El Instituto Costarricense de Ferrocarriles debido a los accidentes que se han presentado entre los trenes apolo, propone la elaboración de un sistema que genere una serie de alertas que sean capaces de ayudarles a gestionar posibles colisiones entre trenes.

Por lo tanto, se procede primeramente con la elaboración del algoritmo, el cual podrá ser implantado en el posterior desarrollo del sistema de alertas del cual disponga el INCOFER.

Este documento refleja el resultado de la formulación, desarrollo y entrega del proyecto en sus distintos apartados donde se describen los antecedentes, justificación, objetivos, alcance limitaciones, marco teórico, procedimiento metodológico, características del algoritmo, resultados obtenidos, cumplimiento de objetivos, conclusiones y recomendaciones.

## 1.2. Antecedentes

En Costa Rica, “el 19 de setiembre de 1985 por la Ley N° 7001 se crea el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), institución de derecho público, con autonomía administrativa, personalidad jurídica y patrimonio propio; se rige por las disposiciones establecidas en dicha ley y sus reglamentos, así como otras normativas que la complementen. Esta ley une los dos ferrocarriles, Atlántico y Pacífico.

Esta entidad ha tenido varios cambios en su administración, por ejemplo, el Ferrocarril Eléctrico al Pacífico pasó a llamarse Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP) en el año 1972, en el período presidencial del señor José Figueres Ferrer (1970-1974). Seguidamente, en 1977 se registró otro cambio llamándose Ferrocarriles de Costa Rica, Sociedad Anónima (FECOSA) subsidiaria de la Corporación Costarricense de Desarrollo (CODESA), integrada por el Ferrocarril al Atlántico y el Ferrocarril al Pacífico<sup>1</sup>, de esta forma se consolida como un instituto autónomo.

A partir del 1 de octubre de 1985 funciona como un ente autónomo denominándose: Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), que tiene a su cargo toda la actividad ferroviaria del país.

Entre 1990 y 1995, la actividad ferroviaria se vio sumida en una profunda crisis económica, por las altas deudas que no se podían cubrir, se decide realizar un cierre técnico, suspendiendo los servicios del ferrocarril en todo el territorio nacional<sup>2</sup>.

En el Gobierno del Lic. Miguel Ángel Rodríguez Echeverría, se emite el Decreto N° 035 del 9 de setiembre de 1998, acordando la reanudación de la actividad ferroviaria en el transporte de personas y cosas, comenzando por la región Atlántica y en las demás regiones donde se estimase oportuno”. (Cecilia A. 2011)

---

<sup>1</sup> Decreto Ejecutivo N° 6686 publicado en el Alcance N° 6 de la Gaceta N° 8 del día 13 de enero de 1977

<sup>2</sup> Este cierre se efectúa mediante el Acuerdo SCD-106-95 del 28 de junio de 1995, dictado por el Consejo de Gobierno del entonces Presidente de la República, Ing. José María Figueres Olsen.

En 2009 se adquiere la flota de trenes apolo. Provocando un aumento positivo en rutas y horarios. Sin embargo, el aumento de trenes genera la necesidad de mantener un control estricto en toda la flotilla. La finalidad de este control es evitar accidentes que conlleven a la suspensión del servicio.

A pesar de que el Instituto Costarricense de Ferrocarriles posee mecanismos de control para evitar en gran medida accidentes. Surge la necesidad de encontrar métodos viables que refuercen la seguridad del usuario. Así mismo reducir la tasa de accidentes en donde se vea involucrado 2 o más trenes.

La red ferroviaria costarricense no es grande, en comparativa con Centroamérica, únicamente es superior sobre Belice y Nicaragua. La red costarricense únicamente cuenta con aproximadamente 278 Kilómetros de longitud. Naciones Unidas (1953). El desarrollo de esta no se encontró en la planificación del desarrollo urbanístico del centro de san José.



**Figura No. 1:** Red de transporte ferroviario costarricense.

**Fuente:** <http://www.incofer.go.cr/>

La poca planificación entre los distintos gobiernos y el futuro incierto de Instituto Costarricense de Ferrocarriles causaron que la red ferroviaria no tenga concordancia con el plano vial actual, múltiples cruces viales sin las condiciones adecuadas, poca señalización, infraestructura insuficiente y falta de presupuesto no colaboraron con la poca vial costarricense sobre el respeto al transporte ferroviario.

Entre los años 2016 y 2017 la cantidad de accidentes de trenes superó los 2501 Se puede decir que casi un accidente cada 3 días durante dos años estuvo pasando en una red ferroviaria no desarrollada y con trenes que no superan los 60 km/h. En el 2018 los accidentes se redujeron, según las estadísticas:

MES	N° Choques	N° Atropellos	N° Pasajeros caídos	N° Descarrilamientos
Enero	7	5	0	0
Febrero	10	2	0	1
Marzo	6	0	1	1
Abril	3	2	0	1
Mayo	9	2	0	1
Junio	8	2	0	4
Julio	11	1	0	0
Agosto	8	3	0	0
Septiembre	8	1	0	3
Octubre	10	1	0	0
Noviembre	10	1	0	0
Diciembre	1	3	0	0
<b>Total</b>	<b>91</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>11</b>

**Tabla No. 1: Estadísticas anuales 2018 INCOFER.**

**Fuente:** <http://www.incofer.go.cr/>

A pesar de reducirse la tasa de accidentes, seguía considerablemente alta, y la afectación por falta de control llevo a la entidad a la búsqueda de soluciones con el fin de establecer un servicio adecuado y seguro tanto para usuarios como para los que comparten las vías.

La suma de todos estos problemas obligo al Instituto Costarricense de Ferrocarriles a invertir sobre el desarrollo de mecanismos en donde se pueda más allá de controlar, predecir y estar preparados para centralizar el control de la red ferroviaria. Sin dejar estas operaciones sujetas a procesos manuales, tal y como se venían realizando.

### 1.3. Problemática

Con la reapertura de los servicios de trenes en 1998 en la administración del Lic. Miguel Ángel Rodríguez Echeverría se establecieron las rutas de servicio:

Ruta	Zonas de cobertura
1	San José-Heredia-San José
2	Metrópoli III en Pavas-Curridabat-Pavas
3	San José-San Antonio de Belén-San José
4	Transporte de banano en Valle La Estrella, Bananito, Estrada, Matina.
5	Transporte de acero de Moín a Leesville en Guácimo
6	Transporte turístico en Limón y Siquirres
7	Transporte turístico a Caldera

**Tabla No. 2:** Zonas de cobertura del servicio ferroviario.

**Fuente:** Elaboración propia.

Para los costarricenses el tren es un medio importante de transporte, según datos del INCOFER, “entre enero y marzo del 2017 se contabilizaron un total de 1.329.549 pasajeros”. (INCOFER. 2017). Sin embargo, este servicio sufre riesgo de que se generen colisiones por el diseño de las rutas. Los peatones, automovilistas y los mismos trenes han generado accidentes graves. Trenes apolo recién puestos en operación:



**Figura No. 2:** Servicio del tren se suspenderá en semana santa.

**Fuente:** <http://www.monumental.co.cr/2018/03/06/servicio-de-tren-en-el-gam-se-suspendera-en-semana-santa/>

Desde la adquisición de los trenes apolos y con el aumento de las rutas se han generado varios accidentes. Los casos más alarmantes se han producido cuando se da el choque entre los mismos trenes. Por ejemplo, el periódico la Nación cita:

*“El accidente, ocasionado por el error de un maquinista, les provocó lesiones a 100 pasajeros, obligó a suspender, durante lunes y martes, la totalidad de viajes en las cinco rutas que opera el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) y sacó de circulación dos trenes más. Además, el Instituto tuvo que suprimir ocho de los 104 viajes que programa a diario debido a las averías en los equipos”.* (Bosque D. 2017).

Otra colisión que salió a luz pública, lo cita el periódico en línea mundocr:

*“Al menos 20 personas resultaron heridas la noche de este lunes luego de que dos trenes propiedad del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), se estrellaran de frente en Santo Domingo de Heredia”.* (Madrigal L. 2017).

Estos medios de comunicación evidencian que la problemática se origina por una mala gestión humana. La administración de estas tareas puede volverse bastante complicada; ya que existen distintas rutas y varios trenes asignados a estas.

El INCOFER cuenta con un personal encargado de monitorear a los choferes y la distribución de los trenes. Esto lo realizan por medio de llamadas o documentación por actas.

Este equipo debe de velar por la ejecución de tareas como: rutas asignadas para cada chofer, cambio de trenes en caso de avería, cambios en rutas por falta de personal, entre otros.

Sin embargo, esta forma de trabajar ha ocasionado diferentes problemas que pueden desenlazarse en accidentes.

Caso contrario ocurre en el transporte ferroviario de Europa, que mediante el uso de programas por ordenador; realizando cálculos de velocidad y distancias, previenen los

choques de trenes. Sin embargo, uno de los obstáculos que sufrieron estas entidades europeas, es que estas soluciones son bastante costosas de implementar.

*“Su coste puede cifrarse en torno a los 25.000 €, lo que resulta muy bajo en relación con sus prestaciones, y debería estar subvencionado por las compañías aseguradoras que son las mayores beneficiarias de sus servicios dado que les ahorrará enormes sumas en el pago de indemnizaciones”.* (Vázquez A, 2013).

Actualmente el Instituto Costarricense de Ferrocarriles no tiene un método para detectar posibles situaciones críticas de choques entre trenes. Por lo tanto, se busca detectar las situaciones de riesgo, mediante un algoritmo que evalúe los distintos casos que se presentan en el sistema ferroviario del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

#### 1.4. Justificación

Las organizaciones que ofrecen servicios públicos o privados deben procurar el establecimiento de mecanismos tecnológicos de acción que les permita ofrecer un servicio de calidad. Más cuando se enfrentan a una sociedad del conocimiento y manejo de las TIC.

Como se mencionaba anteriormente en la problemática, estos procesos se manejan mediante el contacto vía teléfono entre los funcionarios del Instituto Costarricense de Ferrocarriles y un listado de tareas asignadas en documentos.

El periódico la Nación cita:

*“Los accidentes han sido por impericia del conductor, no necesariamente por fallos mecánicos del tren, son causados por otros elementos que no son directamente daño estructural, que van por una vía y se desplomó. Hay, simplemente, un tema de choferes y personal que no toman los protocolos”.* (Bosque D. 2017).

La forma de trabajar del Instituto Costarricense de Ferrocarriles no contempla una manera de prevenir accidentes entre trenes. Por lo tanto, como propuesta se plantea el desarrollo de un algoritmo que permita identificar y alertar posibles situaciones de choque entre trenes.

Este algoritmo no solo beneficiará a la institución, sino también a la población costarricense que hace uso del servicio; reduciendo la tasa de accidentes entre los trenes del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Según cita la Nación, *“se dieron los siguientes accidentes entre trenes dejando grandes daños en los años 2016 y 2017:*

- *En abril de 2016, dos trenes Apolo chocaron de frente en Pavas. La colisión dejó 106 personas heridas y los ferrocarriles con daños serios.*

- *El 2 de octubre del 2017, dos ferrocarriles colisionaron, la razón fue que uno de los maquinistas no guardó la distancia y golpeó por detrás a otro tren. Trece pasajeros sufrieron heridas.*

*El 30 de octubre del 2017 dos Apolos chocaron de frente en Santa Rosa de Santo Domingo de Heredia. El choque ocurrió durante la hora pico, 400 personas viajaban en ese momento, 100 resultaron heridas”. (Bosque D. 2017).*

El desarrollo del algoritmo es una necesidad que le permitirá al INCOFER detectar situaciones de riesgo entre trenes. Las cuales podrían ser perjudiciales para los usuarios y para la institución.

## 1.5. Objetivos

### Objetivo General

- Facilitar al Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), la detección temprana de posibles accidentes ferroviarios, mediante un algoritmo de ramificación y poda, implementado por medio de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

### Objetivos Específicos

1. Analizar las distintas implementaciones realizadas con algoritmos de ramificación y poda, para diseñar un diagrama de flujo de datos (DFD), que permita describir el proceso lógico.
2. Proponer a partir del análisis realizado, un algoritmo de ramificación y poda que permita la detección temprana de posibles accidentes entre ferrocarriles.
3. Implementar el algoritmo propuesto, mediante los datos de entrada proporcionados por los dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS), para evitar posibles accidentes entre ferrocarriles.
4. Evaluar la funcionalidad del algoritmo implementado, mediante escenarios de simulación, con la finalidad de comprobar el funcionamiento correcto.

## 1.6. Alcance

Este proyecto se enfocó en el desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, analizando datos reales de trenes apolo y validando los distintos escenarios que se pueden presentar con el muestreo de datos obtenidos.

Por lo tanto, se siguieron una serie de pasos, para lograr el objetivo definido, abarcando de forma integral las secciones que permiten desarrollar de forma correcta el entregable de este proyecto.

1. Primeramente, gracias a las interacciones con Navegación Satelital de Costa Rica y el Instituto Costarricense de Ferrocarriles, se obtienen los requerimientos para diseñar un diagrama de flujo de datos que permita evidenciar los distintos escenarios ante un posible riesgo de colisión entre 2 trenes.
2. Seguidamente se propone un algoritmo de ramificación y poda que permita la detección temprana de accidentes. Esto después de verificar la información obtenida por los GPS de 6 trenes apolo y poner a prueba el algoritmo de ramificación y poda con los datos de entrada. Se entrega una primera etapa del algoritmo funcional y con evidencia de las pruebas realizadas.
3. Seguidamente el algoritmo de ramificación y poda es implementado en un software desarrollado por Navegación Satelital para enviar las distintas alertas. Este software fue probado y ejecutado en escenarios controlados para probar la eficacia del algoritmo ante distintas pruebas de campo.
4. Al finalizar el desarrollo del algoritmo se evalúan distintos escenarios de los cuales doy por evidenciado el funcionamiento correcto del mismo y es sugerido para su posterior implementación.

Con esto se pretende prevenir posibles accidentes entre trenes que puedan ocasionar daños catastróficos. La finalidad del proyecto es entregar un algoritmo funcional que pueda ser implementado en posteriores aplicaciones para la prevención de colisiones entre los propios trenes.

## **1.7. Limitaciones**

El proyecto se encontrará limitado por distintos factores a continuación representados:

- a. La información suministrada por Instituto Costarricense de Ferrocarriles es de carácter confidencial, se toma como base lo brindado.
- b. Proyecto se encuentra sujeto a las Disposiciones comerciales de Navegación Satelital.
- c. La recolección de datos necesaria para alimentar al algoritmo se encuentra sujeta a la instalación de los dispositivos GPS.
- d. El uso y fin del algoritmo queda a disposiciones del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

## Capítulo 2. Marco Teórico

### 2.1. Marco Referencial

En este apartado se desarrollan los temas relacionados con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), organización la cual hará uso del algoritmo gracias a la colaboración con Navegación Satelital de Costa Rica por sus siglas (NAVSAT). Por lo tanto, su lectura, permitirá mejorar la comprensión del problema y la eventual resolución por medio del algoritmo para detectar posibles colisiones entre trenes.

#### 2.1.1. Historia del Instituto Costarricense de Ferrocarriles

En Costa Rica, *“el 19 de setiembre de 1985 por la Ley N.º 7001 se crea el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), institución de derecho público, con autonomía administrativa, personalidad jurídica y patrimonio propio; se rige por las disposiciones establecidas en dicha ley y sus reglamentos, así como otras normativas que la complementen. Esta ley une los dos ferrocarriles, Atlántico y Pacífico.*

*Esta entidad ha tenido varios cambios en su administración, por ejemplo, el Ferrocarril Eléctrico al Pacífico pasó a llamarse Instituto Costarricense de Puertos del Pacífico (INCOP) en el año 1972, en el período presidencial del señor José Figueres Ferrer (1970-1974).*

*Seguidamente, en 1977 se registró otro cambio llamándose Ferrocarriles de Costa Rica, Sociedad Anónima (FECOSA) subsidiaria de la Corporación Costarricense de Desarrollo (CODESA), integrada por el Ferrocarril al Atlántico y el Ferrocarril al Pacífico, de esta forma se consolida como un instituto autónomo. A partir del 1 de octubre de 1985 funciona como un ente autónomo denominándose: Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), que tiene a su cargo toda la actividad ferroviaria del país.*

*Entre 1990 y 1995, la actividad ferroviaria se vio sumida en una profunda crisis económica, por las altas deudas que no se podían cubrir, se decide realizar un cierre técnico, suspendiendo los servicios del ferrocarril en todo el territorio nacional.*

*En el Gobierno del Lic. Miguel Ángel Rodríguez Echeverría, se emite el Decreto N.º 035 del 9 de setiembre de 1998, acordando la reanudación de la actividad ferroviaria en el transporte de personas y cosas, comenzando por la región Atlántica y en las demás regiones donde se estimase oportuno”. (Cecilia A. 2011).*

En 2009 se adquiere la flota de trenes apolo. Provocando un aumento positivo en rutas y horarios. Sin embargo, el aumento de trenes genera la necesidad de mantener un control estricto en toda la flotilla. La finalidad de este control es evitar accidentes que conlleven a la suspensión del servicio.

#### **2.1.2. Misión**

*La misión de INCOFER corresponde: “Proveer soluciones ferroviarias de calidad para mejorar la movilidad y competitividad del país”.*

#### **2.1.3. Visión**

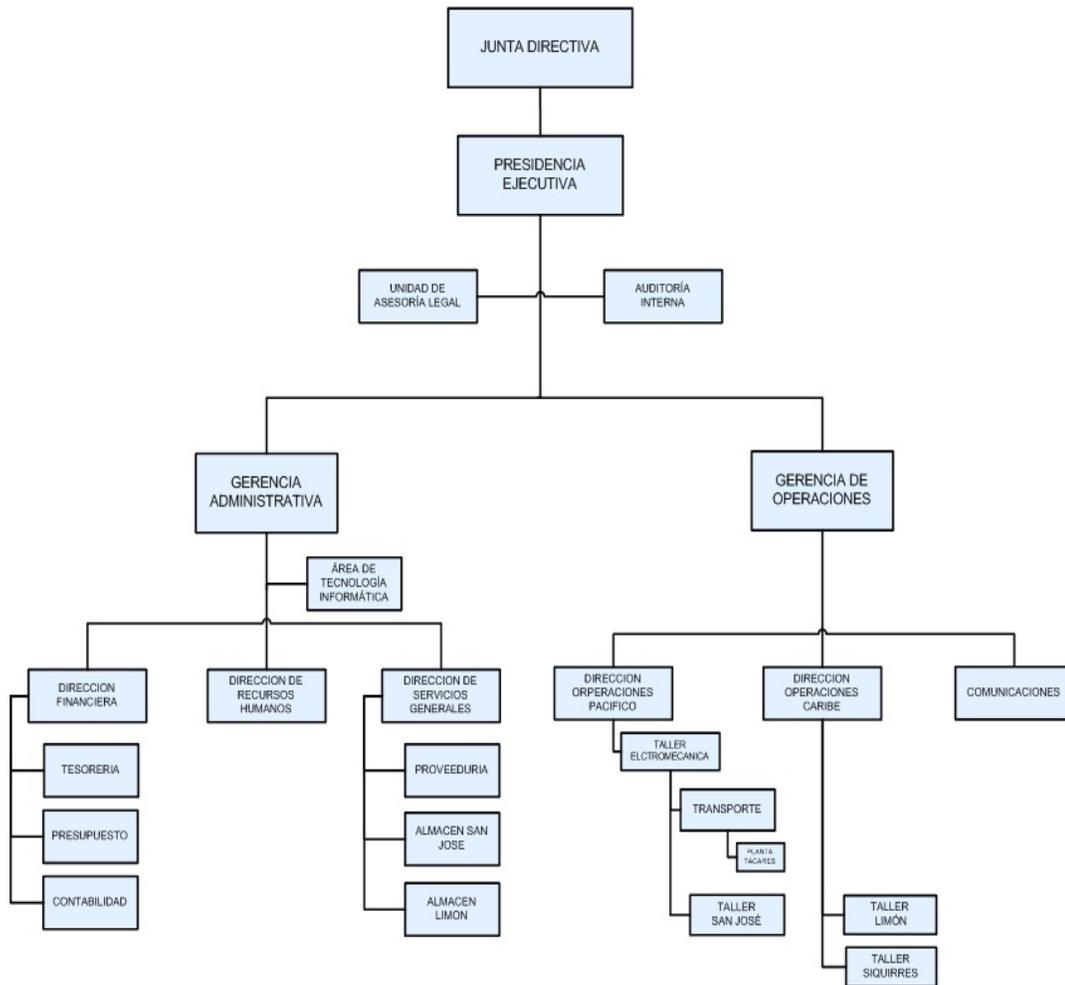
*La visión de INCOFER corresponde: “Ser la opción de movilidad preferida por su eficiencia, sostenibilidad y servicio”.*

#### **2.1.4. Valores**

*El ente público no ha establecido en su estrategia comercial valores que definan o guíen a la organización.*

## 2.1.5. Estructura Organizacional

### INSTITUTO COSTARRICENSE DE FERROCARRILES ORGANIGRAMA



*Gráfico No. 1: Organigrama Instituto Costarricense de Ferrocarriles.*

*Fuente: <http://www.incofer.go.cr/organigrama/>*

### 2.1.6. Trenes Apolo

*“Un tren es un medio de transporte que se caracteriza por estar formado por una combinación variable de vagones, una locomotora que los dirige y por ir sobre rieles de distinto tipo. El tren fue uno de los primeros medios de transporte no manual ya que surgió a partir de los avances de la Revolución Industrial a fines del siglo XVIII. Hoy en día, los trenes son un elemento esencial no sólo para el transporte de personas a corta o larga distancia sino también de productos de muy diverso tipo”.* (Cecilia B. 2010).

En 2009 el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) adquirió una flotilla de trenes apolos. *“Los Apolos fueron adquiridos por FEVE, para renovar el obsoleto parque de máquinas que, a principios de los años 80, circulaba por sus líneas. La cantidad de controles y mecanismos de seguridad que llevaban los nuevos trenes adquiridos a la Maquinista Terrestre y Marítima, en comparación con el material existente, dio origen a la famosa frase que acabó por bautizar a estos automotores de por vida. Esto es más complicado que el mecanismo de un Apolo. (Es una referencia a los cohetes de la NASA. El Programa Apolo comenzó en julio de 1960 cuando la NASA anunció un proyecto a continuación de las misiones Mercury que tenía como objetivo el sobrevuelo de astronautas alrededor de nuestro satélite, destinadas a localizar una zona de alunizaje para conseguir un vuelo a la Luna)”* (Mikel Iturralde. 2009). Los trenes apolo alcanzan una velocidad máxima de 80 km/h.

Trenes Apolo cuando estaban siendo descargados:



**Figura No. 3:** Nuevos trenes Apolo.

**Fuente:** <http://www.cronicaferroviaria.blogspot.com/2011/03/costa-rica-trenes-belen-comenzarian.htm>

### 2.1.7. Estudios Internacionales

Existen alguna implementaciones internacionales muy interesantes, las cuales serán mencionadas a continuación, las mismas buscan controlar y evitar accidentes entre trenes.

Empresas internacionales como Amtrak, han optado por sistemas automáticos de seguridad en las vías y los trenes. Para el caso de Amtrak ubicada en Estados Unidos, en 2015 comenzaron con la instalación de un sistema conocido como “Control Positivo del Tren”.

*“El control positivo de trenes ( PTC ) es un sistema de requisitos funcionales para monitorear y controlar los movimientos de los trenes y es un tipo de sistema de protección de trenes . El término proviene de la ingeniería de control . El tren solo puede moverse en caso de que el movimiento sea positivo . Generalmente mejora la seguridad del tráfico ferroviario. Control positivo de trenes” (Congressional Research Service, 2018)*

Como su definición lo menciona, este sistema funciona mediante el control de los movimientos del tren y su velocidad, permitiendo frenar automáticamente el tren para evitar descarrilamientos, choques con otros trenes, el ingreso de trenes donde se efectúan trabajos de mantenimiento o ingreso a una vía equivocada debido a un error de señalización. Por lo tanto estamos ante un sistema robusto pero sumamente costoso en su implementación rondando su costo de instalación entre US \$6 y 22 mil millones.

*“El costo de implementar PTC en hasta 25 servicios de trenes de cercanías en los Estados Unidos se ha estimado en más de \$ 2 mil millones y debido a estos costos, varios servicios tienen que cancelar o reducir reparaciones, mejoras de capital y servicio. Otros servicios simplemente no tienen los fondos disponibles para PTC y tienen acción diferida asumiendo algún cambio del Congreso. Los ferrocarriles que operan líneas equipadas con señalización de cabina y sistemas de Control Automático de Trenes existentes han argumentado que su historial comprobado de seguridad, que se remonta a décadas, está*

*siendo descartado porque ATC no es tan agresivo como PTC en todos los casos. Control positivo de trenes.” (Positive train control, 2018).*

El sistema de Control Automático de Trenes (ATC), el cual fue desarrollado en Japón para los trenes que viaja a altas velocidades, es otra implementación que debe ser valorada. Esta implementación surge porque los conductores no tenían el tiempo necesario para reconocer las señales en la vía, debido a las altas velocidades a las que viajan estos trenes.

### **Sistema ATC**

*El sistema ATC funciona enviando “información sobre el límite de velocidad para la sección de vía específica a lo largo del circuito de vía . Cuando estas señales se reciben a bordo, la velocidad actual del tren se compara con el límite de velocidad y los frenos se aplican automáticamente si el tren viaja demasiado rápido. Los frenos se sueltan tan pronto como el tren reduce la velocidad por debajo del límite de velocidad. Este sistema ofrece un mayor grado de seguridad, evitando colisiones que pudieran ser causadas por errores del conductor, por lo que también se ha instalado en líneas muy utilizadas, como la Línea Yamanote de Tokio y algunas líneas de metro. Aunque el ATC aplica los frenos automáticamente cuando la velocidad del tren excede el límite de velocidad, no puede controlar la potencia del motor o la posición de parada del tren al entrar en las estaciones. Sin embargo, el sistema de operación automática de trenes (ATO) puede controlar automáticamente la salida de las estaciones, la velocidad entre estaciones y la posición de parada en las estaciones. Se ha instalado en algunos metros.*

*Sin embargo, ATC tiene tres desventajas. Primero, el margen no se puede reducir debido al tiempo de funcionamiento en vacío entre soltar los frenos en un límite de velocidad y aplicar los frenos en el siguiente límite de velocidad más lento. En segundo lugar, los frenos se aplican cuando el tren alcanza la velocidad máxima, lo que significa una menor comodidad de viaje. En tercer lugar, si el operador desea hacer circular trenes más rápidos en la línea, primero se debe cambiar todo el equipo de a bordo y de vía relevante relacionado. Control automático de trenes”. (Automatic train control,2017).*

Una vez comprendido estas implementaciones internacionales, podemos hacernos a la idea de varias desventajas que no van acordes con la realidad nacional.

Desventajas de estos sistemas ante la realidad nacional:

- 1) Implementación bastante costosa: Estas implementaciones rondan los millones de dólares imposibilitando el uso de algunas de estas herramientas por parte del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.
- 2) Se necesitan trenes modernos: Estas implementaciones son pensadas para trenes modernos, con capacidad para ser monitoreados por medio de distintos sensores, incluso con tecnologías en las vías ferroviarias.
- 3) El Instituto Costarricense de Ferrocarriles solo cuenta con trenes Apolo.
- 4) Su funcionamiento se basa en automatizar el movimiento del tren.

Gracias a estos estudios internacionales, podemos darnos cuenta de la importancia de generar un sistema informático o algoritmo capaz de detectar situaciones que puedan generar un posible accidente entre trenes a un muy bajo costo y con la flexibilidad de ser utilizado con los trenes Apolo.

## **2.2. Marco Conceptual**

En esta sección se definirán los conceptos técnicos utilizados en el documento, así como los que fueron necesarios investigar a lo largo de la realización del proyecto, con la finalidad de permitir una mejor ubicación de la problemática y un mayor entendimiento de la solución propuesta.

### **2.2.1. Transporte En Tren**

Desde hace más de 200 años el ferrocarril ha evolucionado a medida en como su país lo ha hecho. Ha sido el medio que forjó las industrias y el desarrollo, Transportando materias primas entre ciudades y conectando las personas entre zonas lejanas. El acceso a los recursos permitió que naciones como EE. UU., Europa u Oriente se desarrollaran de manera contundente, seguido de acceso a sus ciudadanos de transportarse a lo largo de las regiones y compartir conocimiento entre sus pueblos.

La construcción del tren brindaba en su momento un fuerte apoyo a la economía, la construcción brindaba empleo al necesitarse construir las vías y producir mayor cantidad de hierro para estas. Seguido del desarrollo de empresas que brindaban los distintos servicios a lo largo de las vías férreas y adicionalmente el desarrollo de las empresas que a través del ferrocarril expandían su negocio a nuevos mercados.

A lo largo de los años los ferrocarriles evolucionaron, de acuerdo con la zona geográfica y a la economía en la cual se analice el tema, el tren perdió o ganó protagonismo, ya sea para servicios de carga, servicios de larga distancia, transporte público o servicios especiales.

Por ejemplo el uso de las vías férreas en EEUU se encuentra limitada al transporte de personas en ciudades con densidad poblacional alta, pero en las vías férreas de larga distancia, se utiliza el servicio con el fin de transportar carga o material que mediante las calles o autopistas se vuelve complicado por su dimensión, complejidad o costo, o bien en

ciudades desarrolladas como Europa o Japón, el tren es de alta velocidad que permite conectar dos ciudades de la manera más rápida y eficaz en comparación a los otros medios viales existentes.

En Costa Rica el transporte ferroviario se ha mantenido sujeto a las disposiciones y recursos que el Instituto Costarricense de Ferrocarriles mantiene. Ha sido una institución independiente que se ha desarrollado en un ambiente político no colaborativo que en les ha causado desde desaparecer hasta reiniciar la función operativa ferroviaria en varias ocasiones. En su actualidad el tren se encuentra limitado a las distintas locomotoras, donde las Apolo, locomotoras usadas, son lo más moderno con lo que se cuenta. Ha sido un desarrollo lento tanto desde el medio como desde su infraestructura instalada dentro de la ciudad. Principalmente la cultura social ha afectado.

El desarrollo continuo, el Instituto Costarricense de Ferrocarriles adquirió nuevas unidades que se adaptan de mejor manera a las necesidades que se están sufriendo. Estos complementan una etapa del desarrollo que se debe afrontar con la infraestructura completa para que la logística del servicio sea segura, ágil y genere utilidad. Para cumplir con esta etapa es necesario el monitoreo y control de los servicios.

### **2.2.2. Tecnología aplicada al Tren**

Los avances tecnológicos han permitido que el desarrollo del ferrocarril sea cada vez más útil y eficiente a la sociedad. En sus inicios desde máquinas de vapor posteriormente motores altamente ineficientes eran los mismos que impulsaban las máquinas, en su apogeo no existía legislación que les obligara ni cultura que les hiciera pensar en la necesidad de racionalizar por el medio ambiente o los recursos.

En la actualidad la tecnología ha permitido que los trenes sean utilizados de manera eficiente en múltiples áreas, en Japón existen trenes que no tocan los rieles, sino que flotan a través de polos opuestos de imanes, en china y Europa existen trenes que viajan a más de 300

kph sobre rieles, algo impensable hace 20 años. La curva de crecimiento tecnológico ha sido exponencial y ha abarcado a todos con ella.

Los medios de control también se han visto involucrados en el cambio, en inicios no era necesario por su estructura ferroviaria, pero en vistas al desarrollo de estas y el aumento en la velocidad y cantidad de ferrocarriles que pueden usar la misma línea se volvió una necesidad. En su momento walkie talkies eran muy utilizados, o bien radios de baja frecuencia les permitían comunicar mensajes a kilómetros a la redonda, en la actualidad estos no son suficientes.

Sistemas de posicionamiento global (GPS) y sistemas computacionales permitieron centralizar el control de un sistema de transporte, tomar decisiones y cambios basados en la información que estos sistemas les brindaban con el fin de evitar un accidente inminente, o inclusive volver más eficiente el sistema de transporte para atender las horas pico de transporte. Tal cual puede suceder en las horas de ingreso o salida laboral. Estos sistemas permitieron que empresas con trenes que viajan entre 300 kph a 500 kph logren realizarlo con mínimo riesgo operativo.

La economía marca pauta importante en el desarrollo de cualquier país, ya que de acuerdo con el nivel que se tenga por lo usual marcará el tipo de implementos al cual tendrá acceso, véase materialmente para el desarrollo de sus proyectos previos. Por ende, países avanzados y con economías establecidas tienen acceso a financiar sistemas de transporte público de punta, en cambio economías en apogeo o que no se encuentran establecidas por lo usual no tienen acceso a este tipo de proyectos y se basan más en suplir con una necesidad que en mejorarla.

La búsqueda de suplir una necesidad lleva a un país buscar satisfacer una necesidad a pesar de no contemplar otros factores. Su interés es puntual hacia la necesidad por ende lo que se omite no se cumple o bien corren el riesgo bajo condiciones no pertinentes para la seguridad y eficiencia general del servicio. Ejemplo de esto es el hecho de que empresas de

transporte ferroviario se comuniquen bajo radios y que no esté centralizado el control con transporte de pasajeros. Esto pasa en países donde no lo ven como una necesidad primordial.

### **2.2.3. Actualidad del Tren**

Actualmente en Costa Rica existen 9 máquinas operando a su máxima capacidad. A pesar de los esfuerzos del Instituto Costarricense de Ferrocarriles la máquina en funcionamiento más reciente tiene 7 años en operación, de los cuales ya ha pasado en dos países. Pues fueron máquinas adquiridas de segunda mano para que el presupuesto alcanzable a lo que se pretendía realizar.

La máquina más antigua todavía en operación tiene 37 años, con alta ineficiencia y probabilidad de que a lo largo de su función diaria se quede “botada” porque no pudo subir una cuesta o bien porque a pesar de llevar la menor cantidad de vagones posibles, la sobrecarga en estos impidió que pudiera movilizarse.

El Instituto Costarricense de Ferrocarriles a pesar de no mantener el presupuesto, tiene el interés y el horizonte definido sobre que deben desarrollar para mejorar el sistema de transporte ferroviario. La implementación en conjunto con el MOPT de medios físicos y demarcación en carretera para contener y asegurar que no existan errores humanos en los cruces del tren son muestra de ello. Adicionalmente la búsqueda de presupuesto con el fin de aumentar la flotilla determina la línea principal. Según medios, se espera que para el presente año ingresen 8 nuevos trenes nuevos que permitirán volver más eficiente el servicio.

## Locomotora 51



*Figura No. 4: Locomotora 51.*

*Fuente:*<https://www.ameliarueda.com/nota/trenes-de-mas-de-30-anos-operan-en-el-pais-sobre-capacidad>

Parte de este esfuerzo corresponde a los sistemas de posicionamiento global ya implementados en cada una de las locomotoras con el fin de que el control sea centralizado, ya que hace dos años esto no era así, sino que se controlaba mediante radios.

### **2.2.4. Accidentes del Tren**

Los accidentes del tren tuvieron un crecimiento exponencial en un periodo determinado de tiempo en el país por la falta de recursos e infraestructura para controlarlos, desde atropellos, accidentes con carros o bien los menos frecuentes pero que más heridos generan, los choques entre los propios ferrocarriles.

Las estadísticas de accidentes anualmente en el periodo 2016 y 2017 superaron los 400 en sus distintas áreas, estos años fueron contundentes en la inversión y mejoras de su

infraestructura cuando en cuestión de dos años 3 accidentes entre ferrocarriles dejó en total a 219 personas heridas.

A continuación, se presentan los tres accidentes ocurridos desde la adquisición de los trenes Apolo.

- a) En abril del 2016, dos trenes Apolo colisionaron frontalmente en Pavas. La colisión provocó que 106 personas resultaron heridas.



**Figura No. 5:** Choque frontal en pavas.

**Fuente:** Melissa Fernández Silvia

Según versiones preliminares este accidente ocurrió ante la falta de apego al protocolo establecido donde los dos maquinistas (de ambos ferrocarriles) incumplieron con el mismo, causando el aparatoso accidente.

Es importante recalcar que en el momento de este accidente no existía medio digital-tecnológico para el control, sino que se confiaba en los maquinistas para estos cumplir con dicho protocolo y se comunicarán en las zonas de paso de dos trenes.

- b) El 2 de octubre del 2017, colisionan dos trenes Apolo. Provoca que 13 pasajeros resulten heridos. El Instituto Costarricense de Ferrocarriles, lo explica mediante la siguiente imagen. Al igual que en el caso anterior, este es atribuido al irrespeto y la falta de seguimiento a los protocolos ya establecidos por INCOFER.



*Figura No. 6: Choque en el mismo sentido.*

*Fuente: Instituto Costarricense de Ferrocarriles*

- c) El 30 de octubre del 2017, colisionan dos trenes Apolo de frente. Provoca que 100 pasajeros resulten heridos.

Manteniendo la línea, se atribuye al mismo que un error por parte de los maquinistas causó el accidente, donde a pesar de que entre ambos trenes se sumaban más de 200 personas, únicamente 100 necesitaron atención médica.



*Figura No. 7: Choque frontal Santo Domingo de Heredia.*

*Fuente: multimedioscr*

De acuerdo con los últimos accidentes del tren, muestran un factor común. Este corresponde a la falla del control sobre la logística en su operación. Dado que a pesar de que los maquinistas como tal están dotados de equipo de comunicación, no tienen garantía y forma eficiente de notificar ante cualquier eventualidad o ante cualquier error humano como los tres ocurridos en un lapso corto.

La distribución del control causa mayor tiempo de notificación ante una eventualidad, la necesidad de una solución centralizada es primordial para reducir la probabilidad de sucesos con los trenes. Dado a esto es por qué INCOFER mejora sus recursos de Telecomunicaciones con el fin de controlar de mejor manera sus operaciones con el GPS ya funcional en cada maquinaria.

### 2.2.5. Historia del Manejo de emergencias

El aumento de la velocidad, la capacidad y la cantidad de ferrocarriles en las vías, paulatinamente fue aumentando la necesidad de los controles y mejorar la atención ante cualquier eventualidad, cada situación de emergencia aumentaba el riesgo de personas heridas o grandes pérdidas materiales. Dado a esto se inició la implementación de distintos métodos que permitieran notificar y comunicar una situación de emergencia.

A lo largo del tiempo desde los 1800, en el apogeo de las vías férreas se empezaron a patentar distintos mecanismos, entre ellos inicialmente un “detonador” el cual correspondía a un petardo que explotaba y alertaba cuando se pasaban una señalización en la vía. Posteriormente se utilizó un mecanismo que causaba que se alertará mediante un sonido “GONG” a lo interno de la cabina.

Este avance continuo hasta desarrollos electrónicos, donde por ejemplo el CCS por sus siglas en inglés (Continuous Cab Signals) alertaba a lo interno de la cabina mediante luces el tipo de señal próxima a aparecer en la vía. Esto ya ocurría en 1920. La implementación de nuevas tecnologías avanzó al desarrollo de cuartos de control en los inicios del nuevo siglo, contratando personal exclusivamente para el control de vías y transporte, garantizando la seguridad de la operación



**Figura No. 8:** Centro de control ferroviario.

**Fuente:** <https://treneando.com/page/100/?archives-list=1>

A medida que las condiciones mejoran y los controles permiten mantener todo dentro de los parámetros correctos de seguridad y funcionamiento, a mayor velocidad o capacidad del ferrocarril, existe menor probabilidad de accidente, pero mayor probabilidad de que cuando pase, este sea grave. Dado a esto más allá de la prevención los sistemas que se han desarrollado han ido en la línea de predecir cuándo un accidente puede pasar con el fin de centrar de mejor manera el control en un determinado momento.



**Figura No. 9:** *Diario Extra-Choque de trenes deja 10 muertos.*

**Fuente:** <https://www.diarioextra.com/Noticia/detalle/283735/choque-de-trenes-deja-10-muertos>

En la imagen anterior se muestra como una falla en los frenos por desgaste provocó el choque frontal de dos trenes a 100kph. Este suceso ocurrido en Alemania en el 2016 muestra la necesidad de mantener control y predecir las posibilidades durante un determinado evento con el fin de minimizar y mitigar los posibles daños que puedan causar.

El sistema de transporte ferroviario costarricense no cuenta con un sistema a un nivel comparable con las empresas internacionales, pero la presión por mantener un sistema rentable que les permitiera renovar el modelo de transporte que se utiliza fue el que llevó al desarrollo del presente proyecto.

### **2.2.6. Software**

El principio principal para un software en esta área es brindar automatización y soporte vital al personal encargado del control de los ferrocarriles. El ejecutar análisis basados en la información de manera más eficiente evitando el error humano y un lapso mayor de toma de decisión. La función básica de esta aplicación es recaudar la información proveniente de distintos artefactos incluidos dentro del ferrocarril, por ejemplo, GPS, sensores de presión, seguridad, voltaje y demás para brindar una respuesta pronta al operador de los controles cuando los parámetros no se cumplen o bien cuando existe probabilidad de algún suceso.

En los sistemas que se utilizan a nivel internacional se cumplen con estos estándares, inclusive llegando al punto de control y mantenimiento por uso a pesar de que este no haya generado ningún problema. Son niveles de seguridad que permiten el solventar una red de ferrocarriles que viajan a velocidades superiores a los 200 kph a pesar de que necesitan kilómetros para detenerse por completo.

En Costa Rica la necesidad de un sistema que mediante un algoritmo permita colaborar al control y la predicción de posibles accidentes no ha sido implementado, pero la necesidad de INCOFER por tenerlo es clara. La implementación de tecnologías a un alto nivel se ha quedado atrás.

Existen terminologías clave que serán utilizadas en el desarrollo del presente trabajo, se expresan a continuación:

**a) Sistema de Posicionamiento Global (GPS):**

Por motivos de monitoreo, El Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), realizo la instalación de dispositivos con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), a todas sus máquinas mediante la empresa Navegación Satelital de Costa Rica. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), *“es un sistema de navegación basado en satélites y está integrado por 24 satélites puestos en órbita por el Departamento de defensa de los Estados Unidos. Originalmente, fue pensado para aplicaciones militares, aunque a partir de los años 80's el gobierno de USA puso el sistema de navegación disponible a la población civil. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) funciona en cualquier condición climatológica, en cualquier parte del mundo las 24 horas del día. No hay ningún costo de suscripción o cargos iniciales de preparación para usar el GPS”* (Iván O. 2017).

*“Los receptores de GPS en la tierra, calculan rápidamente y con gran precisión los tres valores necesarios para ubicar en un mapa electrónico a un usuario. El valor de Longitud (Meridianos) que es la referencia con respecto al meridiano de GREENWICH o PRIME MERIDIAN hacia el Este (E) o hacia el Oeste (W), el valor de Latitud (Paralelos) que es la referencia con respecto al ECUADOR, hacia el Norte (N) o hacia el Sur (S) y el valor de Altitud que es la referencia con respecto al nivel medio del mar”* (Iván O. 2017).

**b) Algoritmo**

Podemos definir algoritmo, como un *“conjunto de reglas que, aplicada sistemáticamente a unos datos de entrada apropiados, resuelven un problema en un número finito de pasos elementales”* (Ricardo P. 2006).

Esta secuencia de reglas forma modelos para soluciones determinadas en aspectos específicos de un trabajo. Este puede ser desde dentro de una máquina de un hospital hasta un robot utilizado en la producción de vehículos.

Características del algoritmo		
1	Preciso	Es definido y puntual a su solución establecida, sin lugar a ambigüedades.
2	Definido	Si se gestiona este dos veces con la misma información se dará la misma respuesta
3	Finito	Como tal el algoritmo tiene fin.
4	Datos de Entrada	Puede tener cero o más elementos de entrada
5	Producto	Los datos de Salida son la respuesta a las instrucciones establecidas

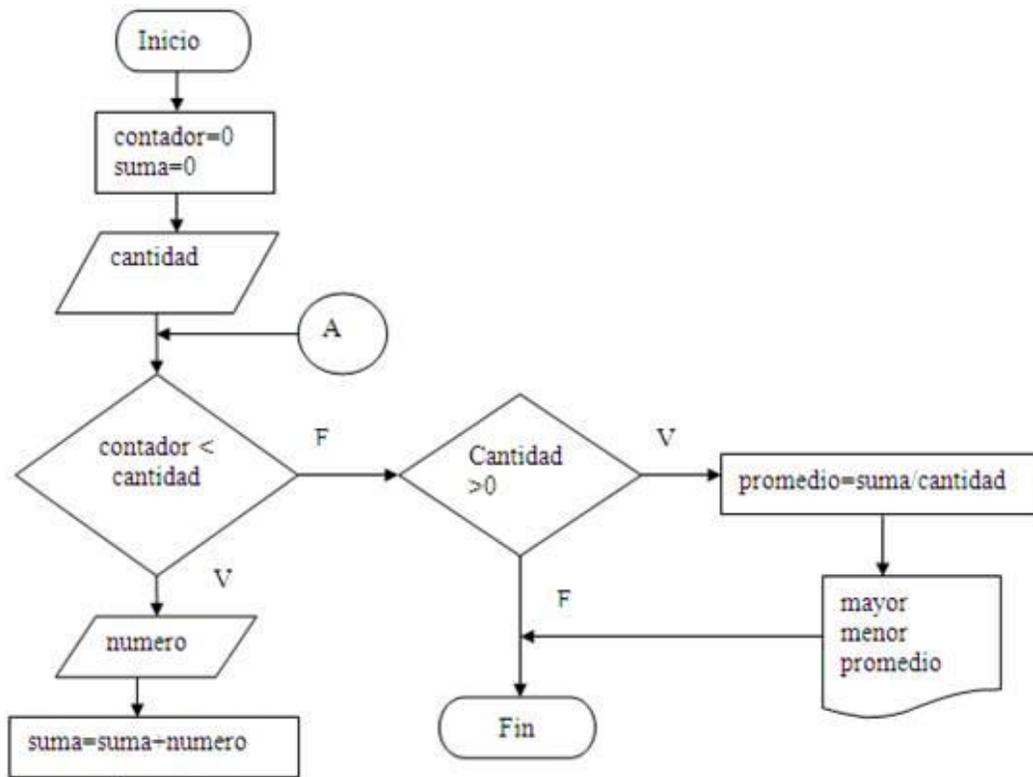
**Tabla No. 3:** *¿Que es un algoritmo?*

**Fuente:** <https://www.tecnologia-informatica.com/algoritmo-definicion>

Para el desarrollo de un algoritmo es importante más allá de definir las reglas, definir los datos de entrada y la unidad, tipo o registro que será utilizado con el fin de no generar conflicto al análisis de estos y que el resultado sea adecuado a la realidad en la que se está aplicando el algoritmo.

El funcionamiento de un algoritmo físicamente a nivel de los ferrocarriles, deben existir distintos dispositivos que trabajen dentro de una red privada, estos son sensores, GPS, giroscopios, altímetros, etc. que mediante algún dispositivo permite establecer VPN con servidores donde se aloja el algoritmo de manera lógica y le presenta al usuario en su interfaz gráfica la información de salida determinada en el algoritmo.

De manera gráfica se muestra a continuación un algoritmo:



**Figura No. 10:** ¿Que es un algoritmo?

**Fuente:** <https://www.tecnologia-informatica.com/algoritmo-definicion>

### 2.2.7. Algoritmo de ramificación y poda

Para este proyecto se utilizó como base el algoritmo de ramificación y poda, el cual se puede interpretar “*como un árbol de soluciones, donde cada rama nos lleva a una posible solución posterior a la actual. La característica de esta técnica con respecto a otras anteriores (y a la que debe su nombre) es que el algoritmo se encarga de detectar en qué ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para «podar» esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima.*”. (Jai V. 2010). La flexibilidad a la hora de elegir nuevos caminos ante un problema, procurando la búsqueda de la solución de la manera más óptima, es lo que promueve la utilización de un algoritmo de ramificación y poda como base del proyecto.

La idea del algoritmo es avanzar entre los nodos descartando variables y procurando llegar a una solución óptima. “*Ramificación y poda es: si la menor rama para algún árbol nodo (conjunto de candidatos) A es mayor que la rama padre para otro nodo B, entonces A debe ser descartada con seguridad de la búsqueda. Este paso es llamado poda, y usualmente es implementado manteniendo una variable global m que graba el mínimo nodo padre visto entre todas las subregiones examinadas hasta entonces. Cualquier nodo cuyo nodo hijo es mayor que m puede ser descartado*”. (Jai V. 2010). Por lo tanto analizaremos el pseudocódigo del algoritmo de ramificación y poda el cual es el siguiente:

```
Función RyP {  
  P = Hijos(x,k)  
  mientras (no vacío(P))  
    x(k) = extraer(P)  
    si esFactible(x,k) y G(x,k) < óptimo  
      si esSolucion(x)  
        Almacenar(x)  
    Sino  
      RyP(x,k+1)  
}
```

## **Análisis del algoritmo de ramificación y poda**

- 1) Podemos notar que **G(x)** hace alusión a la función de estimación del algoritmo. Para el algoritmo propuesto por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles y Navegación Satelital, aquí se recolectan los datos de entrada, los cuales generan las condiciones para la elección de la mejor decisión.
- 2) Para el algoritmo de ramificación y poda, **P** es la pila de posibles soluciones. En el caso del algoritmo propuesto sería que tan cerca de un posible accidente se encuentra los trenes ante las distintas situaciones.
- 3) Los criterios evaluados se miden mediante el método **esFactible**, el cual genera una serie de preguntas dependiendo del dato obtenido por el dispositivo GPS. Estas tramas de datos son divididas y evaluadas según el criterio que se necesite.
- 4) El método **esSolucion**, confirma si se cumplieron los criterios evaluados, y mediante una lista aprueba las distintas posibilidades a la que debe ser evaluada una trama de datos, convirtiéndose en un manejador de tareas hasta que se logre detectar un posible accidente entre trenes.
- 5) Por último **óptimo** es el valor de la función a optimizar evaluado sobre la mejor solución encontrada hasta el momento. En el caso del algoritmo propuesto este valor nos dice que tan cerca están 2 trenes de producir un accidente. Si se cumplen todas las condiciones el algoritmo inmediatamente genera una alerta de colisión en conjunto con todas las reglas que evaluó hasta llegar a la solución.

## **Estrategias de Poda**

Este tipo de algoritmo busca encontrar la solución más óptima a nuestro problema, en este caso es conocer si se va a producir un posible accidente entre trenes, por lo tanto “*nuestro objetivo principal será eliminar aquellos nodos que no lleven a soluciones buenas. Podemos utilizar dos estrategias básicas. Supongamos un problema de maximización donde se han recorrido varios nodos  $i=1, \dots, n$ . estimando para cada uno la cota superior  $CS(x_i)$  e inferior  $CI(x_i)$ .*

### ***Estrategia 1***

*Si a partir de un nodo  $x_i$  se puede obtener una solución válida, entonces se podrá podar dicho nodo si la cota superior  $CS(x_i)$  es menor o igual que la cota inferior  $CI(x_j)$  para algún nodo  $j$  generado en el árbol.*

### ***Estrategia 2***

*Si se obtiene una posible solución válida para el problema con un beneficio  $B_j$ , entonces se podrán podar aquellos nodos  $x_j$  cuya cota superior  $CS(x_i)$  sea menor o igual que el beneficio que se puede obtener  $B_j$  (este proceso sería similar para la cota inferior).” (Jai V. 2010).*

Por consiguiente podemos nombrar 2 formas de recorrer el árbol que forma el algoritmo:

#### **FIFO**

Permite recorrer el árbol por niveles, en este caso el recorrido sería por anchura.

#### **LIFO**

El recorrido del árbol de soluciones se realiza en profundidad, esta búsqueda es la que mejor se adapta a la problemática que estamos resolviendo. Por consiguiente es la que se utiliza para detectar cualquier posible colisión entre trenes.

## **Ventajas de utilizar un algoritmo de ramificación y poda como base**

Dada la experiencia a la hora de construir un algoritmo basado en la funcionalidad del algoritmo de ramificación y poda, podemos describir algunos hallazgos a partir del proyecto los cuales se convirtieron en ventajas:

- 1) Se divide el problema en subconjuntos más pequeños, esto permite analizar gran cantidad de información en poco tiempo.
- 2) Se maneja por medio de condiciones, esto nos permite descartar nodos. Esto es importante ya que a la hora de construir el algoritmo, este debe ser capaz de descartar o aprobar cierta condición.
- 3) Un árbol de decisión es fácil de interpretar y visualizar.
- 4) Se pueden crear diagramas de flujo de datos a partir de las condiciones evaluadas. Por lo tanto podemos representar y clasificar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva.
- 5) Es preciso, ya que dependiendo de los valores de entrada podemos definir las condiciones que deba tomar un paquete de información.

### 2.3. Marco Metodológico

En el siguiente apartado se muestra la metodología utilizada durante el desarrollo y análisis del proyecto para el resultado brindado al Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Siguiendo la línea determinada por los objetivos específicos establecidos, de primera mano antes de iniciar a programar era necesario determinar, diseñar y establecer la línea correcta de desarrollo del programa que evite errores de compilación, de funcionamiento y de seguridad.

Este algoritmo debe ser estable, las posibilidades de error deben ser reducidas al mínimo, ya que se puede depender del mismo en una situación de emergencia.

Dado a esto se deben analizar las distintas implementaciones realizadas con algoritmos de ramificación y poda, para diseñar un diagrama de flujo de datos (DFD), que permita describir el proceso lógico.

Entre las actividades que permiten alcanzar el objetivo:

- a. Se investigó sobre accidentes ferroviarios, la estadística y posibles causas de los accidentes de ferrocarriles en Costa Rica. Adicionalmente de cómo las tecnologías de información y los desarrollos en las empresas de Geolocalización puede colaborar en la implementación de proyectos con los dispositivos que se utilizan.
- b. Se identificaron los algoritmos relacionados con el diseño de Ramificación y Poda, el cómo estos afectan, influyen y permiten la correcta identificación de las alertas necesarias como resultado del programa determinado a crear.
- c. Mediante varias reuniones con el personal de INCOFER y la investigación previa en accidentes ferroviarios se determinaron los requerimientos necesarios sobre información o registros que alimentará el software, y cuáles son los métodos más eficientes para la notificación de alertas para que estas sean funcionales y no pasadas por alto.

- d. Finalmente, en la primera etapa se investigó sobre las tecnologías de posicionamiento global, el alcance de estas y como permiten distintas implementaciones de acuerdo con el negocio específico en el cual se están implementado, incluyendo las distintos medios o plataformas bajo las cuales se trabajan y administran los mismos que les permiten su funcionalidad.

En la segunda etapa, se determinó el proceder y mediante el análisis realizado se propuso un algoritmo que cumpla en primera instancia con la detección temprana de posibles accidentes entre ferrocarriles. Entre las actividades que permitieron alcanzar el objetivo se encuentran:

- a. Se diseñó de manera esquematizada el algoritmo de ramificación y poda, de forma que tomando en consideración todas las variables determinadas del primer objetivo, se permita la detección de posibles accidentes de forma oportuna.
- b. A través del desarrollo del algoritmo en sus distintas etapas, se visualizan, aprenden y aplican las mejores prácticas para la construcción del algoritmo, de forma que mediante mejora continua en cada etapa se depure el código y se vuelva más eficiente el programa.
- c. Se realizan informes de calidad y posibles fallos que permiten evaluar la capacidad y desempeño ante situaciones reales del programa. Estos informes son tomados en cuenta como retro alimentación para el desarrollo final del mismo.
- d. La línea de diseño, correcciones, programación se mantienen de forma constante sobre los algoritmos de ramificación y poda de acuerdo con la investigación realizada en el transcurso del proyecto.

En la tercera etapa, una vez desarrollado y mejorado el algoritmo se implementó y se puso a prueba mediante los datos de entrada proporcionados con los dispositivos de posicionamiento global (GPS) con el fin de determinar las probabilidades de accidentes y visualizar la manera en la cual se evidencian los mismos. Entre las subetapas que permitieron el desarrollo de este proceso se encuentran:

- a. revisión de diseño y aplicación del algoritmo previa a la implementación de este validando posibles errores de desarrollo, que impidan la puesta en marcha del algoritmo ya dentro de equipos de INCOFER

- b. Se implementó el algoritmo en los servidores establecidos de forma que se permita validar que cumple con los estándares y compatibilidad necesaria para poder ponerlo en producción y que este extraiga la información desde los sistemas de control de los dispositivos GPS
- c. Se realizaron informes de detección y resolución de problemas en las distintas etapas de la implementación con el fin de validar que etapas esenciales en el proceso se estén ejecutando de manera oportuna y no causen ningún inconveniente a futuro.

Como última etapa del desarrollo del algoritmo se encuentra evaluar su funcionalidad una vez implementado, mediante distintos escenarios de simulación. De esta manera comprobar el funcionamiento correcto del algoritmo y su comportamiento ante la variedad de posibles situaciones.

Se realizaron varias etapas con el fin de lograr esta meta, entre ellas:

- a. Se realizaron pruebas con escenarios simulados, estos varían en velocidad, distancia y dirección, de forma que interponiendo todos los factores se formaron las pruebas que el algoritmo superó de manera efectiva.
- b. Se analizó el algoritmo en cada resultado obtenido de las pruebas simuladas, de forma que se comprobó el comportamiento y efectividad de este a la hora de procesar los datos.
- c. La documentación se realizó de forma constante durante todo el desarrollo, evaluación y puesta en prueba del algoritmo lo que permitió identificar y mejorar los posibles fallos del sistema a reforzar adicionalmente determinar posibles problemas en la programación o diseño.

## Capítulo 3. Procedimiento metodológico

### 3.1. Estudio de Factibilidad

De acuerdo con la necesidad existente del Instituto Costarricense de Ferrocarriles es factible llevar la propuesta dado que estará respondiendo a una necesidad inmediata de la institución. Además, Navegación Satelital de Costa Rica estará aportando el material tecnológico para el desarrollo del algoritmo.

#### 1. Plan de trabajo

- a. En el siguiente cuadro se expresa la forma en la cual se determinó el proceder en el proyecto y los avances de este:

Etapa	Actividad para ejecutar
1	Análisis de la necesidad
2	Revisión de tipos de algoritmo
3	Desarrollo del algoritmo
4	Puesta a prueba del algoritmo
5	Corrección de errores
6	Versión final validada

*Tabla No. 4: Actividades para ejecutar.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 2. Dispositivos:

##### a. Dispositivos GPS

Se utilizan para localizar. En este caso será utilizado para dar seguimiento de los trenes y obtener información como: localización, velocidad, dirección.

##### b. Servidores

Los sistemas utilizados para el desarrollo y respaldo se almacenarán dentro de la infraestructura tecnológica de Navegación Satelital.

### **3. Lenguajes**

#### **a. Python**

Es un lenguaje de programación interpretado, el mismo se utilizará en este proyecto para obtener la información de los dispositivos físicos.

#### **b. Java**

Es un lenguaje de programación concurrente, orientado a objetos. Java será utilizado para llevar a cabo el desarrollo del algoritmo. Utilizando las mejores prácticas de programación.

### **4. Base de datos**

#### **a. MySQL**

Es una base de datos relacional, Se utilizará para guardar las distintas tramas de los dispositivos GPS.

### **5. Nube de Azure**

Es una creciente colección de servicios, que servirá para implementar un API que pueda ser accedido por distintos sistemas de información de manera efectiva y segura.

### **6. Sistema de alertas**

Las alertas serán implementadas mediante un programa desarrollado en Java. El mismo podrá realizar el envío de alertas mediante: SMS, correo y alertas sonoras. Las alertas sonoras se activan tanto en los trenes del INCOFER como en las oficinas administrativas, para el personal que la entidad haya destinado a mantener la seguridad.

### 3.1.1. Factibilidad Técnica

Para poder desarrollar el Proyecto fue necesario disponer tanto de recurso humano como tecnológico, estos recursos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla de Recursos

Recurso	Suplido
<b>Ingeniero en Sistemas. Expertos en el tema.</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Postulante del proyecto</li><li>2) Navegación Satelital de Costa Rica posee la cantidad de recursos humanos para apoyar el proyecto.</li></ol>
<b>Recurso tecnológico</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) NAVSAT brindó el equipo de cómputo necesario para su desarrollo, por lo cual el postulante hace uso de una computadora portátil de la empresa.</li></ol>
<b>Infraestructura tecnológica</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) NAVSAT en conjunto con el INCOFER brindaron los equipos necesarios para el desarrollo del algoritmo (Servidores, GPS, equipos en ferrocarriles).</li></ol>
<b>Herramientas Digitales</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1) Se utilizaron herramientas como Windows, Eclipse como IDE para programar en el lenguaje JAVA, MySQL como base de datos, cuyas licencias ya se encontraban adquiridas por parte de NAVSAT.</li></ol>

*Tabla No. 5: Tabla de recursos.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.1.2. Factibilidad Económica

La viabilidad del proyecto yace en la necesidad de reducir los gastos innecesarios por pago de mano de obra y materia prima para solucionar los problemas generados por

accidentes entre ferrocarriles, más aún control y seguridad sobre las operaciones al ser un servicio social que convive con vidas humanas.

La factibilidad del proyecto llega a ser cualitativa como cuantitativa, permite reflejar el proyecto tanto en una necesidad actual como traer beneficios a futuro. En la actualidad se aplica en la seguridad del usuario, en la calidad del servicio y esencialmente en la reducción de probabilidades de accidentes entre ferrocarriles. No se puede determinar de manera cuantitativa un beneficio al instante, pero de manera cuantitativa se refleja que el presupuesto anual de INCOFER no será afectado por gastos de emergencia no predispuestos o esperados.

A futuro, para el desarrollo e inversión sobre las operaciones, el brindar nuevos trenes a los usuarios, el desarrollo de este algoritmo permite asegurar la viabilidad y posibilidad de que esto se realice de manera efectiva y que se saque mayor provecho a la red ferroviaria. Adicionalmente para el desarrollo del algoritmo durante el proyecto se aprovecharon los recursos brindados por Navegación Satelital de Costa Rica, tales como dispositivos GPS, servidores web, licencias, servidor de base de datos, comunicación y redes; entre otros; lo cual hizo factible el desarrollo del proyecto.

Para efectos de información; ya que la totalidad del proyecto fue costeadada por Navegación Satelital en conjunto con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles, se realiza una investigación, donde podemos apreciar el desglose de los costos de esta implementación. La misma se detalla a continuación mediante la siguiente tabla:

<b>Recursos</b>	<b>Costo</b>
<b>Servidor Debian 9</b>	\$600 / mes, nube de Azure
<b>Portátil Lenovo</b>	\$80 / mes, sistema de arrendamiento
<b>Dispositivos GPS (Unidad)</b>	\$50 Instalación - \$15 / mes
<b>Total</b>	\$730

**Tabla No. 6:** Tabla de costo de recursos.

**Fuente:** Elaboración propia.

Recursos GPS	Costo
Dispositivos GPS instalación (Unidad)	\$100 instalación
Dispositivos GPS mensualidad (Unidad)	\$30 / mes
<b>Total</b>	\$130

**Tabla No. 7:** Tabla de costo de instalación del dispositivo GPS.

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2. Fase de Modelado

El desarrollo del algoritmo inicia un 04 de febrero del 2019 con la Dirección del gerente de operaciones y el equipo de Navegación Satelital de Costa Rica como patrocinador, sujeto a la supervisión y necesidades del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Se realizaron reuniones periódicas con el personal de NAVSAT y el INCOFER para validar los avances, riesgos y estado del desarrollo del algoritmo en cada una de sus fases.

Actividades	Duración
Requerimientos.	2 semanas
Análisis de variables.	3 semanas
Prueba conceptual de variables	1 semana
Desarrollo del algoritmo	4 semanas
Pruebas del algoritmo	2 semanas
Ajuste de variables según el análisis de las pruebas.	3 semana

**Tabla No. 8:** Tabla de actividades.

**Fuente:** Elaboración propia.

Durante el desarrollo del algoritmo se fueron contemplando y evolucionando los distintos factores y variables involucradas. Mediante las reuniones y el análisis respectivo, procuramos que las mediciones de velocidad y distancia fueran las adecuadas según los criterios del Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Como resultado del conocimiento claro de los requerimientos, se modela el diagrama de flujo del funcionamiento del algoritmo el cual se puede consultar en el Anexo A.

### 3.3. Fase de Desarrollo

Una vez analizadas las necesidades del INCOFER, se creó un algoritmo de prueba o prototipo, el cual, mediante una serie de elementos de entradas o datos, los cuales fueron recopilados por los dispositivos GPS instalados, propicio que se realizaran las respectivas pruebas.

El desarrollo del algoritmo se realizó mediante el IDE Eclipse y el lenguaje de programación JAVA, posteriormente se instaló en un servidor de aplicaciones Linux con la distribución Debian. El algoritmo también hace uso de una base de datos MySQL para guardar la información histórica y consultar ciertos elementos de entradas necesarios para su funcionamiento. Cada uno de sus apartados y funcionalidades se describen a continuación.

#### 3.3.1 Elementos de entrada

El algoritmo desarrollado permite la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, para lo cual en conjunto con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles y Navegación Satelital de Costa Rica se definieron una serie de elementos de entrada necesarios para el funcionamiento del algoritmo.

```
@SuppressWarnings("rawtypes")
private void VerificoChoque() {
    limpiaListZonas();
    ArrayList<String> limpia = new ArrayList<String>();
    boolean choque=false;
    if(Config.listaFinal!=null){
        if(Config.listaFinal.size()>0){
            Iterator it = Config.listaFinal.entrySet().iterator();
            while (it.hasNext()) {
                Map.Entry e = (Map.Entry)it.next();
                choque=ComparacionConTrenes((String)e.getKey(),(Choque)e.getValue());
                if(choque==true){
                    limpia.add(e.getKey().toString());
                }
            }
        }
    }

    if(limpia!=null){
        if(limpia.size()>0){
            for(String obj : limpia){
                Config.listaFinal.remove(obj);
            }
        }
    }
}
```

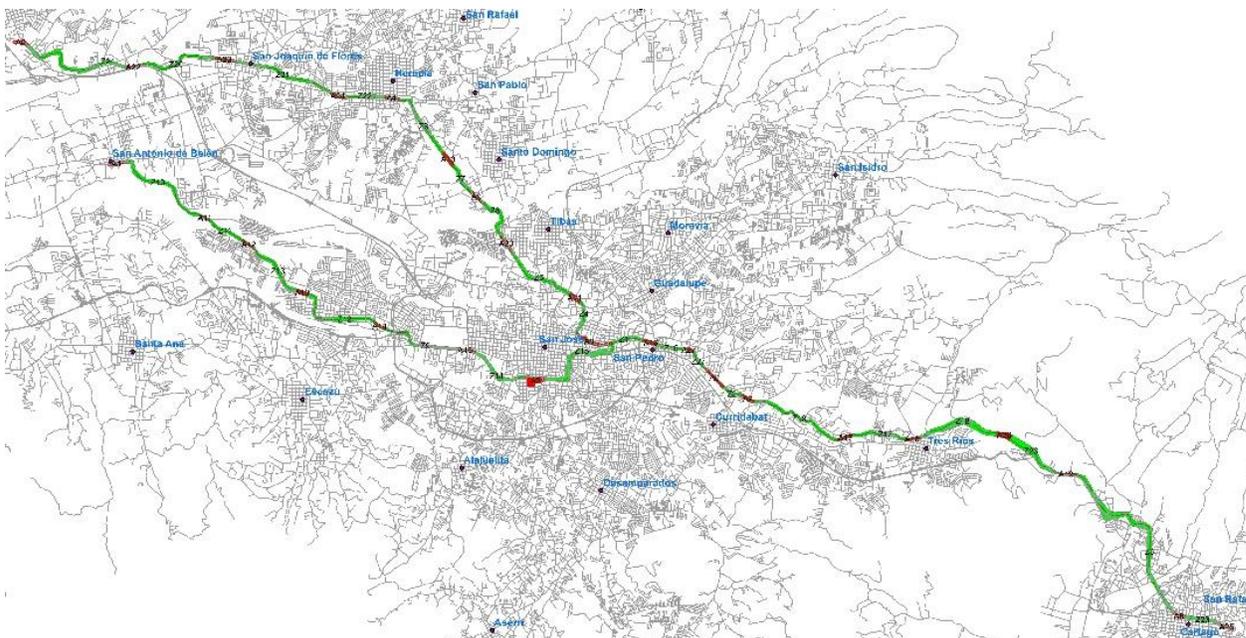
**Figura No. 11:** Código Fuente de: filtración y verificación de choque.  
**Fuente:** Elaboración propia.

El algoritmo es capaz de reconocer las distintas situaciones que pueden ocasionar un accidente a través de los siguientes elementos de entrada descritos:

1. Mapeo Geográfico de segmentos
2. Dirección
3. Distancia
4. Velocidad

### 3.3.1.1 Mapeo geográfico de segmentos

El primer elemento de entrada fue implementado con el fin de proporcionar al algoritmo un conocimiento geoespacial de la red ferroviaria. Los segmentos son porciones demarcadas dentro de la red ferroviaria con la cual el algoritmo evalúa la posición y el grado de peligrosidad al que puede estar expuesto un tren.



**Figura No. 12:** Visualización de segmentos, geocercas.

**Fuente:** Elaboración propia.

Estos segmentos están divididos en 2 secciones:

1. Apartaderos: Son las geocercas seguras, donde el algoritmo no validará posibles accidentes. En estos lugares suelen agruparse múltiples trenes de manera controlada. En la imagen se colocan de color rojo con código asignado con la letra A y un número, esto para saber la ubicación del tren en el mapa mediante un código alfanumérico que puede ser comparado con el mapa.
2. Zonas: Las zonas son las geocercas inseguras donde el algoritmo validará posibles accidentes. Son tramos largos donde 2 trenes pueden encontrarse viajando y ocasionar un posible accidente. En la imagen se encuentran de color verde y se identifican mediante la letra Z y un número.

Ventajas de tener el mapeo de segmentos:

- Precisión: Mediante el mapeo de segmentos, el algoritmo no tiene necesidad de validar la información proveniente de los trenes que se encuentran detenidos en los apartaderos. Esta ventaja permite al algoritmo enfocarse en los trenes que pueden estar en riesgo de colisión.
- Conocer la posición geográficamente de los trenes involucrados: El mapa dividido en segmentos permite al algoritmo asociar la posición específica de un tren con respecto a otro dentro de la red ferroviaria. Esto con el fin de filtrar solo la información de los trenes que se encuentren en los segmentos denominados: zonas.

Ejemplo de código de programación en lenguaje Java, donde se cargan los segmentos en 2 listas distintas, con lo cual el algoritmo determina cuáles trenes se encuentran en los distintos segmentos.

```
geocercasListAparta = MDao.GetGeoListA();  
geocercasListZonas = MDao.GetGeoListZ();
```

### **3.3.1.2. Dirección**

La dirección o azimut de los trenes permite conocer el sentido o ángulo exacto que indica el GPS. Este punto le indica al algoritmo la orientación del tren.

Es importante identificar la dirección a la cual se dirigen los trenes; ya que con esto el algoritmo puede comprender si los trenes viajan en el mismo sentido o se encontrarán de frente.

Cuando el algoritmo detecta que 2 trenes viajan de frente en un segmento de los denominados zonas, inmediatamente arroja resultados que le permiten al INCOFER tomar una decisión.

Si por el contrario el algoritmo detecta que viajan en el mismo sentido, entran en juego dos elementos de entrada adicionales para no generar falsas alertas. Estos elementos son:

- Distancia
- Velocidad

### 3.3.1.3. Distancia

Como se viene mencionando, el algoritmo es capaz de determinar cuáles trenes se encuentran en apartaderos o zonas (lugares inseguros). Por lo tanto, conocer la distancia entre trenes que viajan en las zonas (lugares inseguros), es importante para poder activar mecanismos de alertas.

En conjunto con el equipo de Navegación Satelital y el Instituto Costarricense de Ferrocarriles logramos determinar que una distancia mayor a 250 metros y menor a 500 metros entre trenes era la idónea para activar alarmas de un posible accidente.

Método desarrollado para la evaluación de la distancia:

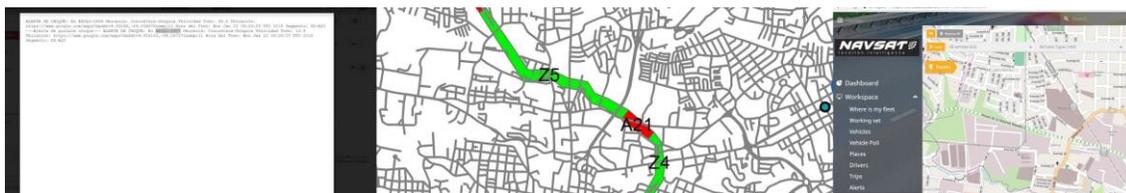
```
public boolean evaluarDistancia(Tren a, Tren b){  
  
    boolean estado = false;  
  
    double distancia = GeoCalculo.geoDistance(a.getLatitude(), a.getLongitude(),  
b.getLatitude(), b.getLongitude());  
if(distancia >0.25 && distancia <0.5)  
{  
        estado = true;  
}  
return estado;  
}
```

### 3.3.1.4. Velocidad

De acuerdo con parámetros establecidos e indicados por INCOFER, para ser tomados en cuenta por el algoritmo, los trenes deben viajar a una velocidad superior a los 20 km/h, este valor fue determinado luego de las pruebas ejecutadas y la visualización de las incidencias en el piloto del algoritmo.

Se recalca que los dispositivos GPS permiten identificar velocidades inferiores, pero de acuerdo con solicitud del ente público solo los que viajen a esta velocidad o mayor pasaran el filtro de entrada de datos para ser contemplados por el algoritmo.

Imagen de trenes viajando en el mismo sentido detectados por el algoritmo:



**Figura No. 13:** Visualización de trenes viajando en mismo sentido.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.4. Fase de Despliegue**

En la fase de despliegue, se activa el piloto del algoritmo, con el cual podemos ver su funcionamiento desde el servidor, haciendo uso de los requerimientos solicitados. Se revisa que su funcionamiento sea el óptimo y que la conexión con el servidor de base de datos sea el adecuado.

### **3.5. Fase de Control**

Se hace el seguimiento del piloto, el cual inicio el 18 de junio del 2019 y finalizo el 16 de septiembre del 2019, en el cual se pudo recopilar información importante para su posterior puesta en producción.

Durante esta fase se comprobó que el funcionamiento del algoritmo fuera el correcto y propiciará seguridad a la hora de ejecutarse.

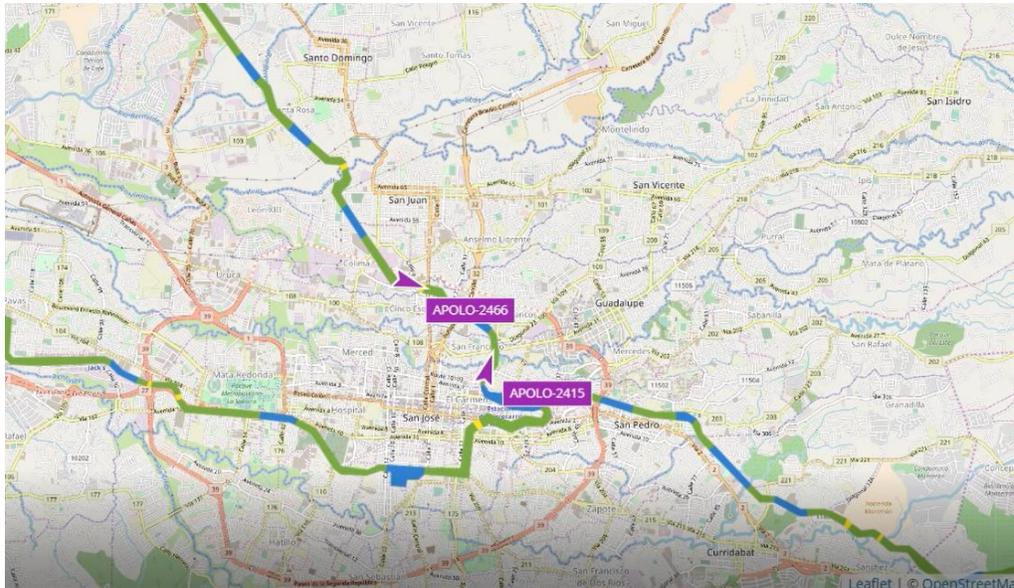
### **3.6. Fase de Análisis**

Se realizó una validación de la operación, funcionamiento y lógica del algoritmo mediante el piloto con la fase de control. Este fue ejecutado en 8 locomotoras que de manera activa participaron con el fin de alimentar de datos al algoritmo y sustentar los posibles resultados. Además, se generaron datos simulados con el fin de generar escenarios de diversos accidentes con el fin de comprobar el funcionamiento del algoritmo.

Es evidente que el algoritmo no se puede comprobar al 100% dado que conlleva un riesgo de pérdidas materiales al ejecutar la prueba, más allá del uso de recursos destinados para un servicio público. Por lo cual durante jornadas laborales los datos recabados permiten moldear y alinear el algoritmo a su futura funcionalidad de detección.

Las pruebas ejecutadas, analizaron el comportamiento de los trenes en segmentos del trayecto o ruta que tienen asignados. Paulatinamente agregando más elementos al algoritmo ya que el mismo debe funcionar en su totalidad en la red completa del transporte público. En las siguientes imágenes se pueden observar algunas de las pruebas realizadas, pero para una mayor comprensión se puede consultar el (Anexo J):

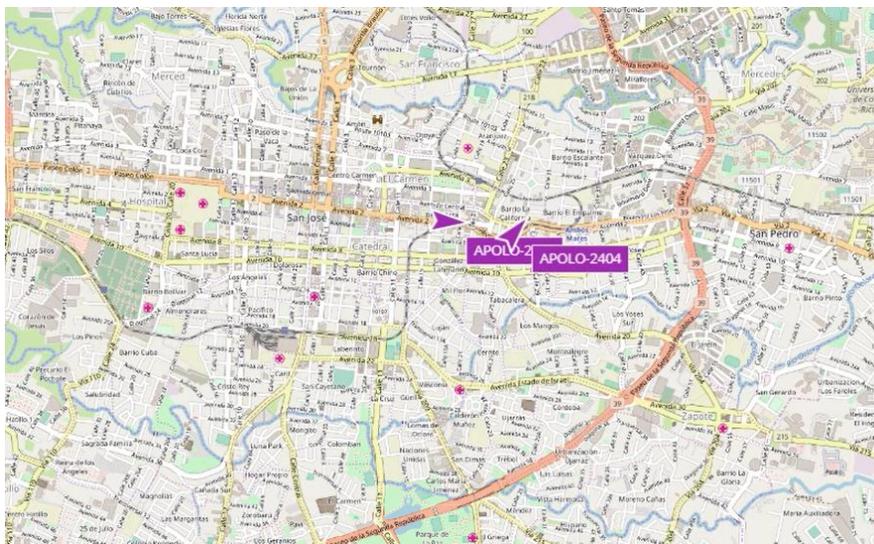
En esta primer imagen, podemos apreciar 2 trenes, específicamente el tren APOLO-2466 y el tren APOLO-2415 viajando en sentido contrario, generando un posible accidente frontal. El algoritmo fue capaz de identificar el comportamiento de estas unidades.



**Figura No. 14:** Visualización de trenes choque frontal.

**Fuente:** Elaboración propia.

En esta imagen, podemos apreciar el recorrido de 2 trenes viajando en el mismo sentido, la distancia y velocidad a la que viajaban género que el algoritmo detectara un posible accidente en el mismo sentido.



**Figura No. 15:** Visualización de trenes mismo sentido.

**Fuente:** Elaboración propia.

## Capítulo 4. Análisis Retrospectivo

El flujo resultante utilizado en el algoritmo fue modelado con la herramienta Microsoft Office Visio 2010 (Anexo A), la cual permitió utilizarlo como referente para la construcción de la solución final. La aprobación de los requerimientos el cual puede ser consultado en el Anexo D y la eventual aprobación de la construcción del algoritmo Anexo E, da como resultado el diagrama de flujo inicial para la fase de desarrollo.

Este diagrama de flujo fue entregado y aprobado por los interesados del proyecto. Con ellos se cumplió con el primer objetivo específico:

*“Analizar las distintas implementaciones realizadas con algoritmos de ramificación y poda, para diseñar un diagrama de flujo de datos (DFD), que permita describir el proceso lógico”.*

Para el análisis del algoritmo, se implementó una versión de prueba o prototipo donde mediante un proceso incremental se fueron agregando las diversas funcionalidades, las cuales fueron analizadas, desarrolladas y probadas con la finalidad de obtener una versión funcional a la que posteriormente se realizaron las pruebas de campo, validadas por Navegación Satelital y el Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

Para esto se realizó el análisis de las distintas variables propuesta por el INCOFER y en conjunto con Navegación Satelital se logra concretar algunos valores iniciales útiles para implementar una versión final. Como resultado se elabora el acta de aprobación de la construcción (Anexo E), con cual se da por concluido el segundo objetivo específico:

*“Proponer a partir del análisis realizado, un algoritmo de ramificación y poda que permita la detección temprana de posibles accidentes entre ferrocarriles”.*

Una vez analizadas y revisadas las funcionalidades del algoritmo el mismo fue desarrollado y entregado al INCOFER, los cuales gracias al apoyo de Navegación Satelital aún se encuentran añadiendo nuevas implementaciones.

Esto permite completar la fase de desarrollo, para lo cual se ejecutó un piloto iniciando un 18 de junio del 2019 y finalizando el 16 de septiembre del 2019, dando como resultado un acta de ejecución de piloto (Anexo G) y finalización de piloto (Anexo H). Esto da como resultado la conclusión del tercer objetivo específico:

*“Implementar el algoritmo propuesto, mediante los datos de entrada proporcionados por los dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS), para evitar posibles accidentes entre ferrocarriles”.*

En conjunto con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles y gracias al piloto ejecutado, logramos realizar diversas pruebas con datos tanto simulados como reales, con la finalidad de ajustar los valores y lograr evitar falsos positivos en las zonas o geocercas inseguras. Estas pruebas de campo se basaron en el ajuste de los parámetros propuestos. Se elabora un acta de aceptación de pruebas (Anexo F), la cual certifica la realización de las pruebas y permite completar la fase de pruebas y cumplir con el cuarto objetivo específico:

*“Evaluar la funcionalidad del algoritmo implementado, mediante escenarios de simulación, con la finalidad de comprobar el funcionamiento correcto”.*

Una vez finalizada la construcción del algoritmo y realizadas las pruebas y el piloto; se da por concluido el proyecto. Se elabora la acta de cierre del proyecto (Anexo I), donde procedemos a liberar el algoritmo para su eventual utilización.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Se concluye de manera efectiva el proyecto, puesto que se cumplieron los objetivos propuestos y acordados en la elaboración del algoritmo. Entre ellos:

- 1) Se genera un diagrama de flujo de datos (DFD), del modo de funcionamiento del algoritmo, el cual permite describir el proceso lógico. Este diagrama se puede apreciar en el (Anexo A).
- 2) Se analiza el algoritmo de ramificación y poda, sus características y estrategias de recorrido del árbol de soluciones, con el cual pudimos analizar el pseudocódigo esencial para el desarrollo.
- 3) Se desarrolla el algoritmo, el cual es implementando en un software de alertas funcional. Además se detallan en el documento los valores de entradas utilizados.
- 4) Se realizan pruebas validadas por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles y Navegación Satelital las cuales fueron documentadas y aprobadas. Estas pruebas se detallan en el (Anexo J).
- 5) Los valores de entradas son configurables, esto permite al Instituto Costarricense de Ferrocarriles establecer nuevos valores según sus análisis.

Por consiguiente podemos mencionar algunas conclusiones puntuales del proyecto:

- 1) Se obtiene la capacidad para detectar posibles accidentes entre trenes.
- 2) Se identifican las zonas de mayor peligro en la red ferroviaria, gracias a la información obtenida por el algoritmo.

- 3) Se logra probar de manera correcta las funcionalidades implementadas en el algoritmo, las cuales cumplen con las necesidades establecidas como prioridad para la prevención de posibles accidentes entre trenes, todo con la finalidad de procurar mayor seguridad a los ciudadanos que utilizan el servicio.
- 4) Se obtuvo como producto el algoritmo, el cual podrá ser implementando en el sistema que desee el Instituto Costarricense de Ferrocarriles, demostrando su deseo por evolucionar tecnológicamente para el bien común de las personas que viajan en trenes.
- 5) Se logra obtener información de las situaciones de riesgo para su posterior análisis.
- 6) Costo de reparación por colisión entre trenes nulo, permitiendo al Instituto Costarricense de Ferrocarriles ahorro de dinero y mantener el servicio funcionado.
- 7) Salvaguardar la vida de los usuarios, gracias a que podemos prevenir un eventual accidente entre trenes.

Se da el cierre del proyecto el 16 de junio del 2020, según indica el acta de cierre (Anexo D), por lo que el algoritmo puede ser utilizado en cualquier software que amerite verificar posibles accidentes entre trenes.

Gracias a este proyecto el Instituto Costarricense de Ferrocarriles, adopta una herramienta efectiva que viene a beneficiar al costarricense a la hora de utilizar el servicio público y garantizar esa seguridad que se ha perdido por incidentes del pasado.

Por último se debe considerar que el algoritmo pasa a ser una herramienta que fortalece el servicio pero no el principal responsable de cualquier incidente que ocurra en un futuro; por lo tanto el Instituto Costarricense de Ferrocarriles debe velar por seguir fortaleciéndose en materia tecnológica y seguir implementando métodos o herramientas que mejoren la seguridad a la hora de viajar en este servicio público.

## 5.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos con la ejecución de las pruebas se encontraron varios puntos de mejoras dentro de las variables que conforman el algoritmo. Los cuales se detallan a continuación:

- 1) Se recomienda seguir ajustando los valores de entrada para minimizar falsos positivos en las situaciones de choque en mismo sentido del algoritmo. Valores como la velocidad y distancia pueden ajustarse para brindarle al algoritmo mayor exactitud a la hora de contemplar un eventual accidente.
- 2) Las geocercas son necesarias para el funcionamiento del algoritmo, por lo tanto se recomienda ajustar las zonas (lugares peligrosos), para abarcar lo mejor posible la red ferroviaria. Ajustar estas zonas le permite al algoritmo tener un menor índice de fallo a la hora de evaluar una posible colisión. Este ajuste se debe implementar siguiendo las recomendaciones de Navegación Satelital y las diversas situaciones que se puedan generar en la red ferroviaria.
- 3) Es importante mantener actualizado el mapeo de unidades analizadas por el algoritmo. El Instituto Costarricense de Ferrocarriles debe velar porque las unidades que requieran ser evaluadas, se encuentren dentro de este mapeo; una vez instalado el GPS el personal de Navegación Satelital en Conjunto con el Instituto Costarricense de Ferrocarriles, deben coordinar que estas tareas se hagan de forma eficiente.
- 4) Se recomienda al personal de Navegación Satelital y al Instituto Costarricense de Ferrocarriles asignar personal para brindar el soporte necesario y análisis de las distintas eventualidades que genere el algoritmo.

- 5) Se recomienda crear un servidor de redundancia por alguna eventual caída o fallo, con esto se aseguran de que el servicio siga funcionando ante cualquier riesgo informático.
  
- 6) A futuro con el cambio de trenes, se plantea la opción de manipular mecanismo automáticos dentro de los trenes gracias a los dispositivos GPS y sensores. Algunas de estas opciones automáticas serian:
  - a) Frenado automático del tren; esto facilitaría las tareas después de detectada una posible colisión.
  
  - b) Restricción de zonas automáticas en donde el tren detecte que no debe cruzar cierta zona. Esto permitiría evitar que los trenes se encuentren en sectores de la vía ferroviaria en reparación o alguna otra situación.
  
  - c) Velocidad máxima automática por secciones de la red ferroviaria; esto permitiría limitar la velocidad máxima de un tren desde una sala de control a cualquier segmento de la red ferroviaria.
  
  - d) Alertas sonoras dentro de la cabina del tren y sala de control. Esto automáticamente generadas cuando el algoritmo detecte alguna posible colisión.

## Bibliografía

- Bosque, D. (s. f.). Choques tienen servicio de tren al borde del colapso. Recuperado 6 de noviembre de 2017, de <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/choques-tienen-servicio-de-tren-al-borde-del/YKCATPTKORFFJG5T7LMY6UCVIY/story/>
- Madrigal, L. M. (s. f.). Varios heridos tras chocar dos trenes del INCOFER en Santo Domingo de Heredia. Recuperado 30 de octubre de 2017, de <https://www.elmundo.cr/costa-rica/varios-heridos-tras-chocar-dos-trenes-del-incofer-santo-domingo-heredia/>
- Schofer, J. L. (s. f.). Mass transit. Recuperado 30 de enero de 2018, de <https://www.britannica.com/topic/mass-transit>
- Bosque, D. (2017, 21 noviembre). Choques entre trenes obligan al INS a aumentar requisitos al INCOFER para renovar póliza. Recuperado 31 de mayo de 2018, de <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/choques-entre-trenes-obligan-al-ins-a-aumentar/ZZPGLQKRRFR7KAR3HZU6ISYKM/story/>
- Bosque, D. (2018, 23 mayo). INCOFER enfrenta 8 juicios por lesiones y muertes en choques. Recuperado 31 de mayo de 2018, de <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/incofer-enfrenta-8-juicios-por-lesiones-y-muertes/QG3YTQJWUNEGHAL252LRIF7GFM/story/>
- Definición de Tren. (s. f.). Recuperado 31 de mayo de 2018, de <https://www.definicionabc.com/tecnologia/tren.php>
- Estadísticas | INCOFER. (s. f.). Recuperado 1 de noviembre de 2018, de <http://www.incofer.go.cr/estadisticas/>

GPS - Tecnologías de la comunicación. (s. f.). Recuperado 1 de junio de 2018, de <https://sites.google.com/site/tecnologiascomunicacionutiel/home/gps#:~:text=El%20sistema%20de%20posicionamiento%20global,Defensa%20de%20los%20Estados%20Unidos>

Historia | INCOFER. (s. f.). Recuperado 12 de septiembre de 2018, de <http://www.incofer.go.cr/historia/>

Porras, K. (2018, 9 enero). 2017 registró 153 choques contra el tren. 33 más que el 2016. Recuperado 9 de noviembre de 2018, de <https://www.monumental.co.cr/2018/01/09/2017-registro-153-choques-contra-el-tren-33-mas-que-el-2016/>

Unidad Editorial Internet. (2013, 30 julio). Como prevenir accidentes de tren. Recuperado 1 de mayo de 2018, de <https://www.elmundo.es/elmundo/2013/07/30/noticias/1375171215.html>

Los trenes Apolo llegan a Costa Rica. (2009, 11 abril). Recuperado 31 de mayo de 2018, de <https://treneando.com/2009/04/11/los-trenes-apollo-llegan-a-costa-rica/>

Arguedas C., J. E. C. B. (2017, 2 noviembre). Grave olvido de maquinista causó choque de trenes. Recuperado 20 de septiembre de 2019, de <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/grave-olvido-de-maquinista-causo-choque-de-trenes/ZYXR6IXO7FGDXPRZH4A4M6LUJM/story/>

Misión y visión | INCOFER. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2020, de <http://www.incofer.go.cr/mision-y-vision/>

Que es una Geocerca? | Verizon Connect México. (s. f.). Recuperado 29 de septiembre de 2019, de <https://www.verizonconnect.com/mx/glosario/que-es-una-geocerca/>

Seguridad y control del tráfico de trenes sobre la infraestructura gestionada por ADIF |

Indra. (s. f.). Recuperado 3 de noviembre de 2019, de

<https://www.indracompany.com/es/seguridad-control-traffic-trenes-infraestructura-gestionada-adif>

PiperLab. (s. f.). Página no encontrada. Recuperado 11 de mayo de 2019, de

<https://piperlab.es/glosario-de-big-data/modelosalgoritmicos/#:%7E:text=Un%20algoritmo%20es%20un%20conjunto,de%20un%20tipo%20de%20problemas.>

C. (2016, 9 abril). Choque frontal de trenes en Costa Rica deja varios heridos.

Recuperado 10 de agosto de 2019, de

<https://cnnespanol.cnn.com/2016/04/08/choque-de-trenes-en-costa-rica-deja-varios-heridos/#0>

Prensa.com. (2009, 24 junio). Prueban sistema que debió evitar choque de trenes en EU.

Recuperado 20 de julio de 2020, de [https://www.prensa.com/mundo/Prueban-sistema-evitar-trenes-EU\\_0\\_2596240533.html](https://www.prensa.com/mundo/Prueban-sistema-evitar-trenes-EU_0_2596240533.html)

Fernández, J. G. (2016, 19 febrero). Tecnología española para acabar con los accidentes

ferroviarios. Recuperado 20 de agosto de 2020, de

<https://www.expansion.com/economia-digital/innovacion/2016/02/18/56c5f0fb46163f782d8b45b7.html>

Precedo, J. (2014, 4 junio). El sistema de seguridad original habría parado el tren de

Santiago. Recuperado 11 de septiembre de 2020, de

[https://elpais.com/politica/2014/06/04/actualidad/1401910560\\_123227.html](https://elpais.com/politica/2014/06/04/actualidad/1401910560_123227.html)

CORDIS | European Commission. (s. f.). Recuperado 10 de octubre de 2020, de

<https://cordis.europa.eu/article/id/415763-new-train-tracking-technologies-improve-european-train-control-system/es>

Control positivo de trenes - Positive train control - qaz.wiki. (s. f.). Recuperado 10 de octubre de 2020, de

[https://es.qaz.wiki/wiki/Positive\\_train\\_control#:~:text=El%20control%20positivo%20de%20trenes,que%20el%20movimiento%20sea%20positivo%20.](https://es.qaz.wiki/wiki/Positive_train_control#:~:text=El%20control%20positivo%20de%20trenes,que%20el%20movimiento%20sea%20positivo%20.)

Control automático de trenes - Automatic train control - qaz.wiki. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2020, de [https://es.qaz.wiki/wiki/Automatic\\_train\\_control](https://es.qaz.wiki/wiki/Automatic_train_control)

Ramificación y poda - es.LinkFang.org. (s. f.). Recuperado 17 de octubre de 2020, de [https://es.linkfang.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n\\_y\\_acotaci%C3%B3n](https://es.linkfang.org/wiki/Ramificaci%C3%B3n_y_acotaci%C3%B3n)

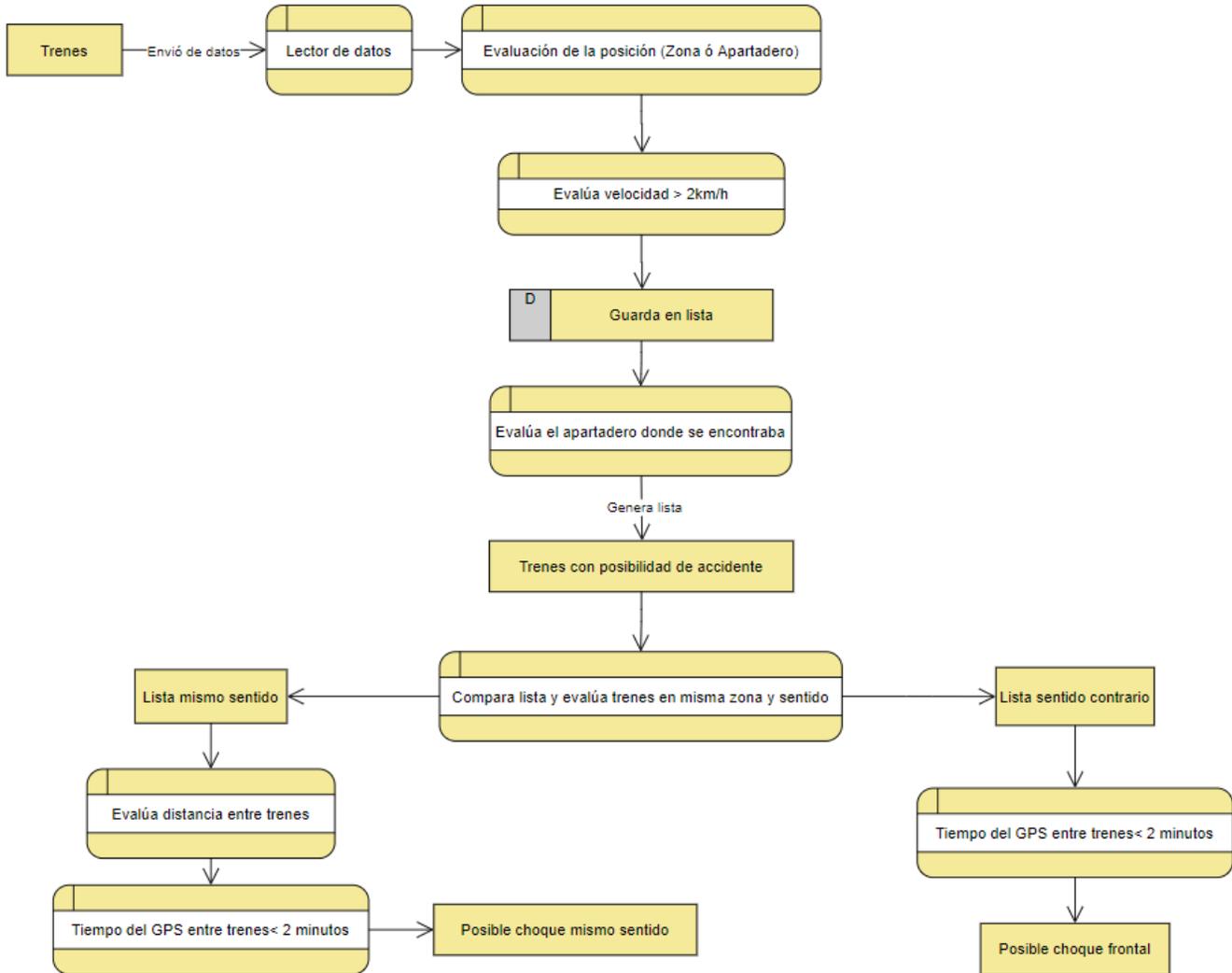
Peña, R. (2006). *Euclides a JAVA: Historia de algoritmos y lenguajes de programación* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Madrid, España: Nivola Libros y Ediciones.

Cairó. (2002). *Estructuras de datos* (2.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Madrid, España: McGraw-Hill

Aguilar, J. (2004). *Fundamentos de programación, algoritmo, estructura de datos y objetos* (4.<sup>a</sup> ed., Vol. 1). Madrid, España: McGraw-Hill.

## Anexos

### A. Diagrama de flujo del algoritmo



## B. Carta del tutor

Universidad Nacional  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Escuela de Informática



San José, 22 de Agosto del 2018

Señores  
Comisión de Trabajos Finales de Graduación

Estimados señores:

Por este medio yo, Carlos L. Chanto Espinoza, portador de la cedula de identidad 503020651, les informo que he aceptado ser el tutor académico del alumno: Michael Alejandro González López, en el proyecto titulado: **"ALGORITMO PARA IDENTIFICAR POSIBLES SITUACIONES DE CHOQUES ENTRE TRENES DEL SERVICIO DE TRANSPORTE PÚBLICO DEL INCOFER PARA EVITAR ACCIDENTES"**.

Extiendo la presenta para formalizar mi rol de tutor y brindarle mi apoyo al estudiante.

Sin más que agregar,

Ph.D. Carlos L. Chanto Espinoza  
Telf. (+506) 25626262  
Fax (+506) 2665-5630 / 26656251  
Celular. 8342.9147  
E-mail: carlos.chanto.espinoza@una.cr

## C. Carta de la Empresa Patrocinadora

Universidad Nacional  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Escuela de Informática



San José, 03 de Setiembre del 2018

Señores,  
Comisión de Trabajos Finales de Graduación

Estimados señores:

En mi calidad de Gerente de Operaciones de la empresa Navegación Satelital de Costa Rica S.A., muy respetuosamente, me permito manifestarle nuestro apoyo incondicional al Ingeniero Michael Alejandro González López, para que desarrolle el proyecto de graduación denominado "ALGORITMO PARA IDENTIFICAR POSIBLES SITUACIONES DE RIESGO DE ACCIDENTES ENTRE UNIDADES DEL SERVICIO DE TRANSPORTE FERROVIARIO PÚBLICO NACIONAL".

No omitimos manifestarles nuestro agradecimiento por la aprobación del citado proyecto, ya que para NAVSAT es una valiosa oportunidad.

Sin más que agregar,

Ing. José Miguel Guesumaria Paladino,  
Gerente de Operaciones  
Navegación Satelital de Costa Rica S.A.

NAVIGACION SATELITAL DE COSTA RICA, S.A.  
N 9 57' 19.5" / W 84 11' 40.4"  
Forum 2, Edificio D, 4<sup>to</sup> Piso  
Santa Ana, San José • Costa Rica  
www.navsat.com  
Teléfono: +506 2205-1400

## D. Acta de aprobación de Requerimientos

### ACTA DE APROBACIÓN DE REQUERIMIENTOS

#### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

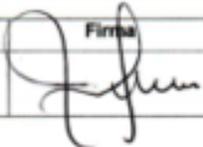
**Fecha:** 01 de enero del 2019

En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 01 de enero del 2019, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar los requerimientos para el desarrollo del algoritmo.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
1. Diagrama de flujo del algoritmo
2. Especificación de requerimientos del algoritmo.

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaría Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

## E. Acta de aprobación de Construcción

### ACTA DE ACEPTACIÓN DE CONSTRUCCIÓN

#### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

**Fecha:** 04 de febrero del 2019

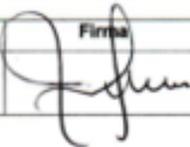
En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 01 de febrero del 2019, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar la construcción del algoritmo.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
--------------------------------------

- |   |
|---|
| 1. Inicio del desarrollo del algoritmo con los requerimientos establecidos. |
| 2. Especificación de material necesario para la construcción.               |

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaría Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

## F. Acta de Aceptación de Pruebas

### ACTA DE ACEPTACIÓN DE PRUEBAS

#### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

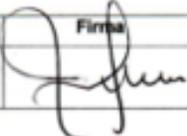
**Fecha:** 12 de marzo del 2019

En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 12 de marzo del 2019, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar la construcción del algoritmo.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
1. Inicio del desarrollo del algoritmo con los requerimientos establecidos.
2. Especificación del material necesario para la construcción.

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaria Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

## G. Acta de Ejecución del Piloto

### ACTA DE EJECUCIÓN DE PILOTO

#### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

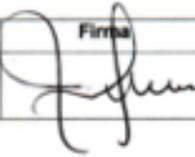
**Fecha:** 18 de junio del 2019

En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 18 de junio del 2019, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar la etapa de ejecución del piloto.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
1. Algoritmo probado y revisado por los interesados.
2. Verificación de incidentes resultados del algoritmo.

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaría Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

## H. Acta de Finalización del Piloto

---

### ACTA DE FINALIZACIÓN DEL PILOTO

#### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

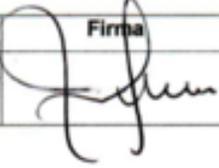
**Fecha:** 16 de septiembre del 2019

En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 16 de septiembre del 2019, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar la etapa de finalización del piloto.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
1. Seguimiento del piloto.

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaría Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

## **I. Acta de Cierre del Proyecto**

## ACTA DE CIERRE DEL PROYECTO

### Descripción del proyecto

Desarrollo de un algoritmo de ramificación y poda, en el Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER), para la detección temprana y verificación de posibles accidentes ferroviarios entre trenes, mediante el uso de dispositivos con la tecnología de Posicionamiento Global (GPS).

**Empresa:** Navegación Satelital de Costa Rica S.A. e Instituto Costarricense de Ferrocarriles.

**Fecha:** 16 de junio del 2020

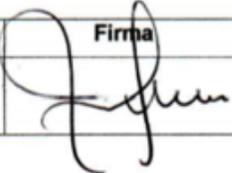
En las oficinas de Navegación Satelital, Fórum 2 Santa Ana, San José, el 16 de junio del 2020, se reúnen los suscritos, tomándose la determinación de aprobar el cierre del proyecto.

Damos por concluidas y recibidas las siguientes actividades y entregables:

Actividades y entregables concluidos
--------------------------------------

- |  |
|--|
| 1. Entrega del informe final del proyecto. |
|--|

Por medio de la presente, los firmantes certificamos que las actividades definidas para esta etapa fueron revisadas y aprobadas por la empresa y damos por finalizada esta etapa del proyecto.

Nombre	Área	Rol en proyecto	Firma
José Miguel Gesumaría Paladino	Gerente de Operaciones	Encargado del proyecto	

### J. Informe de pruebas

#### Informe de pruebas

En el siguiente informe se encuentran las pruebas realizadas durante el tiempo que funciono el piloto del algoritmo, iniciando un 12 marzo del 2019 con la acta de aceptación de pruebas. El documento a continuación registra diversas ocasiones en las que el algoritmo detecto una posible situación de accidente. Por lo que se procede a mostrar dichas pruebas para respaldo de los interesados en el proyecto.

Número de máquinas evaluadas: 8

Número de ocasiones correctas registradas: 546

Número de ocasiones falsas o dudosas registradas: 28

### **Ocasiones falsas o dudosas**

Se contabiliza como una situación falsa o dudosa, cuando los eventos generado por los GPS contienen algún fallo que no hace posible la validación de los distintos elementos de entrada. Por lo tanto se puede crear alguna falsa situación de choque que el algoritmo trate evaluar, generando un falso positivo. En el piloto y fase de pruebas obtuvimos un número de 28 ocasiones falsas o dudosas, provocadas por falta de señal GPS.

### **Ocasiones correctas**

Se contabiliza como una situación correcta, cuando los eventos cumple de manera correcta todas la validaciones contempladas por el algoritmo. Se pudo comprobar que 546 ocasiones se generaron de forma correcta, lo que propicio el ajuste de geocercas, distancia y la velocidad a la que deben viajar los trenes para que se genere una posible situación de accidente.

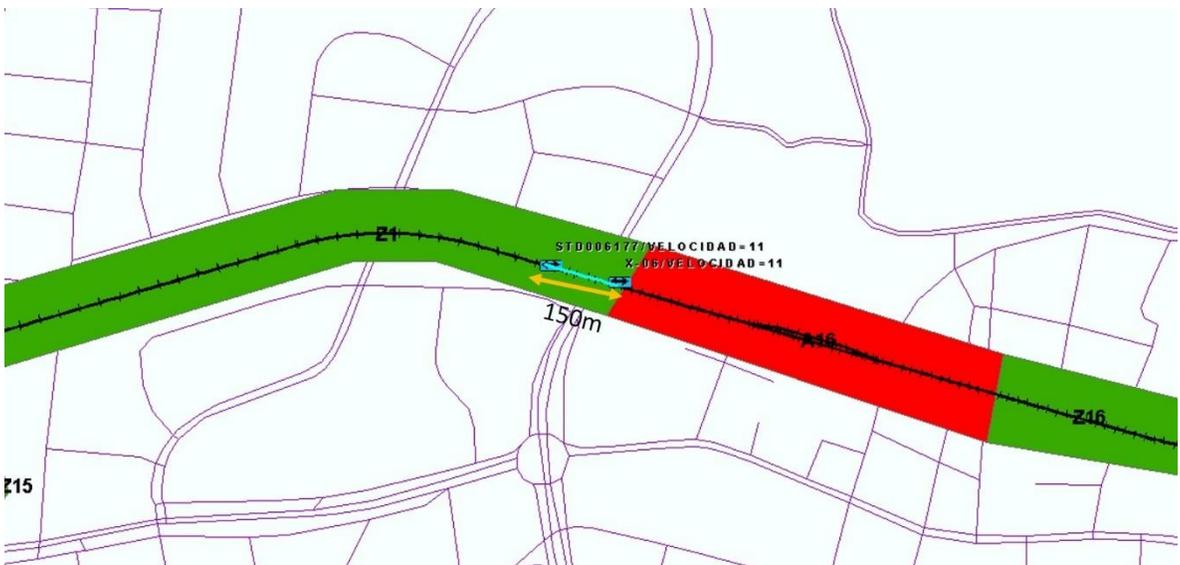
A continuación se extraen algunos ejemplos analizados por el algoritmo: Los siguiente eventos se dieron entre trenes viajando a una situación de choque frontal.

Para que se cumpla la siguiente situación ambos trenes deben provenir de apartaderos o geocercas distintas marcadas en rojo y encontrarse en las zonas demarcadas en color verde. Para este tipo de situación se informan todos los eventos que vayan generando una situación de choque frontal, sin importar a la distancia a la que se encuentren.

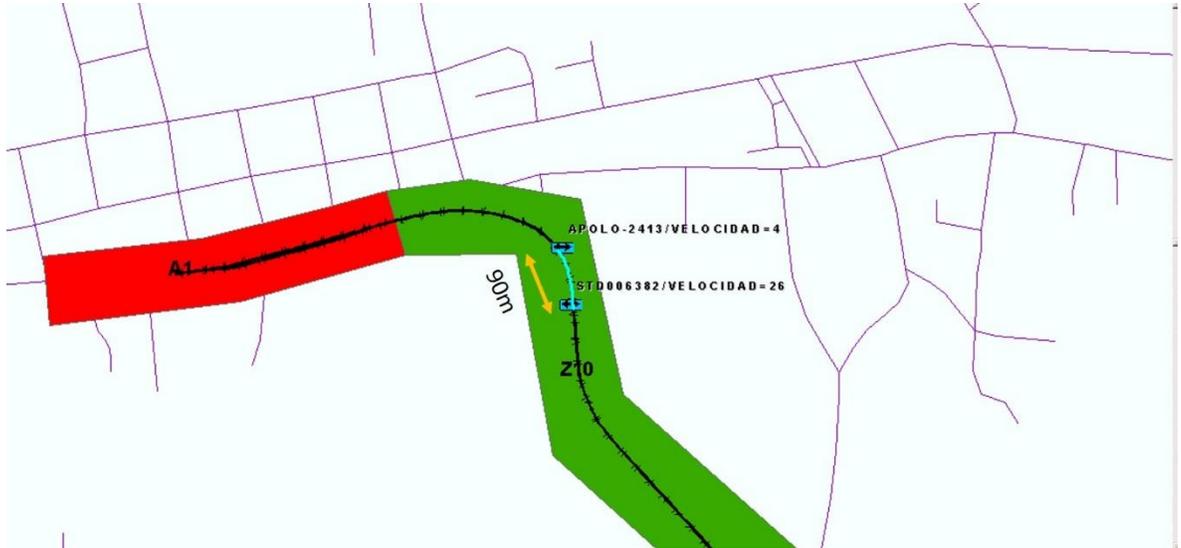
En esta imagen podemos ver la cantidad de ocasiones en que el algoritmo logró detectar que 2 trenes estaban viajando para propiciar un posible choque frontal.



14 de marzo del 2019, Trenes activan alerta de choque frontal. Los mismos se encuentra a 150 metros de frente viajando a 11 km/h.



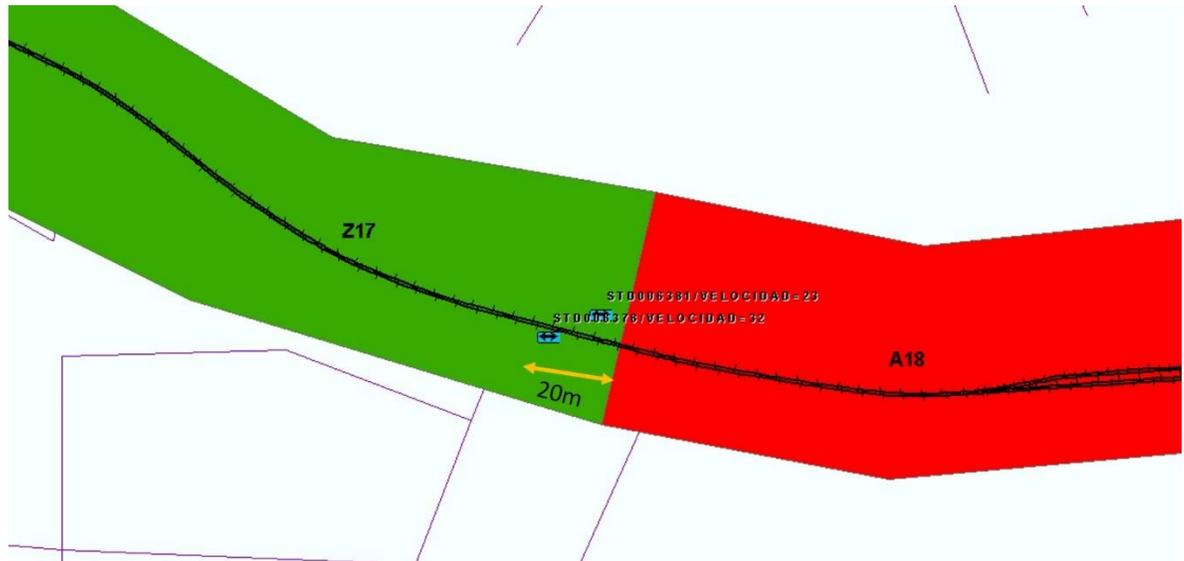
10 de abril del 2019, Trenes activan alerta de choque frontal. Los mismos se encuentra a 90 metros de frente. Velocidad del tren1: 24 km/h. Velocidad del tren2: 4 km/h.



24 de abril del 2019, Trenes activan alerta de choque frontal. Los mismos se encuentra a 135 metros de frente. Velocidad del tren1: 24 km/h. Velocidad del tren2: 18 km/h.

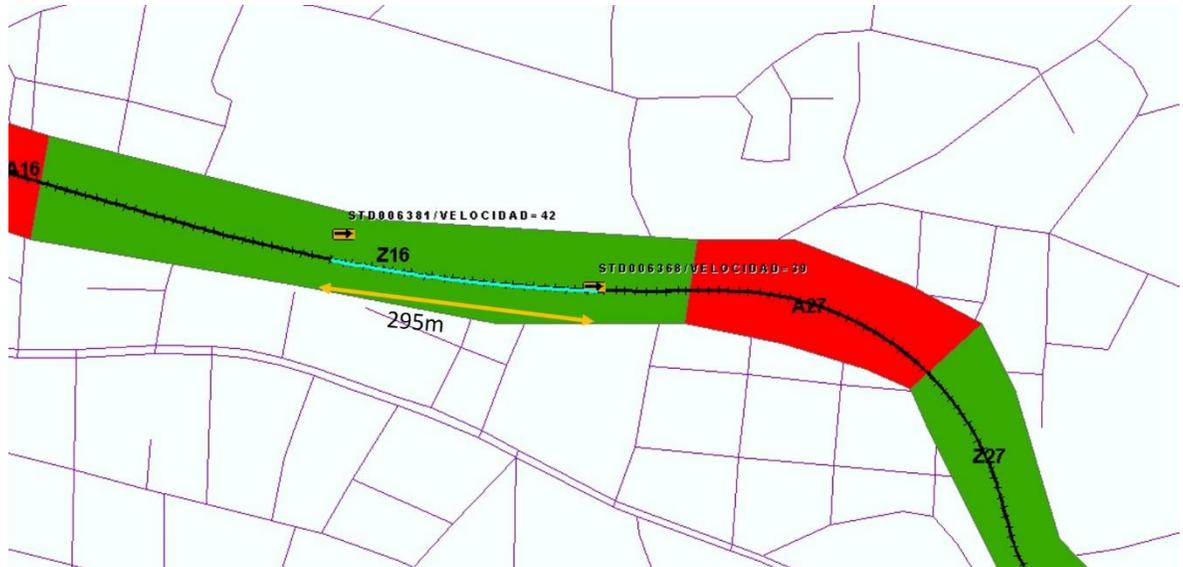


08 de mayo del 2019, Trenes activan alerta de choque frontal. Los mismos se encuentra a 20 metros de frente. Velocidad del tren1: 23 km/h. Velocidad del tren2: 32 km/h.



Los siguiente eventos se dieron entre trenes viajando en mismo sentido. Para que se cumpla la siguiente situación ambos trenes deben provenir de la misma geocerca marcada en rojo (apartadero) y avanzar a una distancia mayor a 250 metros y menor a 1 kilómetro.

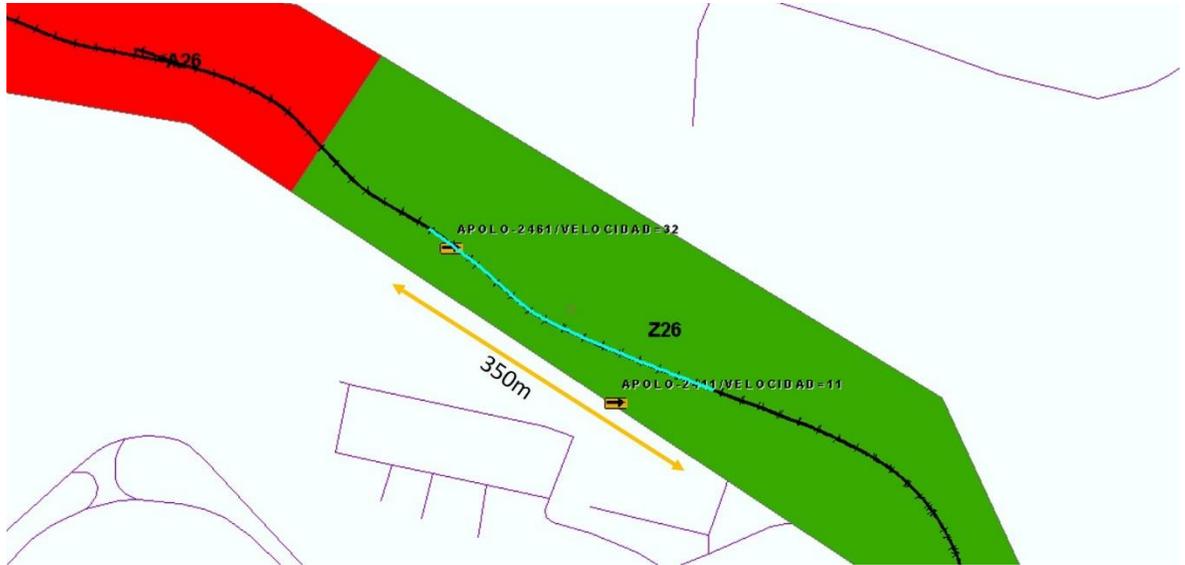
25 de marzo del 2019, Trenes activan alerta de choque mismo sentido. Los mismos se encuentra a 295 metros de distancia. Velocidad del tren1: 42 km/h. Velocidad del tren2: 39 km/h. Ambos provenían de la geocercas o apartadero A16 y viajan en la zona Z16.



2 de abril del 2019, Trenes activan alerta de choque mismo sentido. Los mismos se encuentra a 290 metros de distancia. Velocidad del tren1: 41 km/h. Velocidad del tren2: 39 km/h. Ambos provenían de la geocercas o apartadero A22 y viajan en la zona Z20.



7 de mayo del 2019, Trenes activan alerta de choque mismo sentido. Los mismos se encuentra a 350 metros de distancia. Velocidad del tren1: 11 km/h. Velocidad del tren2: 32 km/h. Ambos provenían de la geocercas o apartadero A19 y viajan en la zona Z26.



8 de agosto del 2019, Trenes activan alerta de choque mismo sentido. Los mismos se encuentra a 270 metros de distancia. Velocidad del tren1: 16 km/h. Velocidad del tren2: 18 km/h. Ambos provenían de la geocercas o apartadero A21 y viajan en la zona Z5.



23 de agosto del 2019, Trenes activan alerta de choque mismo sentido. Los mismos se encuentra a 290 metros de distancia. Velocidad del tren1: 21 km/h. Velocidad del tren2: 42 km/h. Ambos provenían de la geocercas o apartadero A4 y viajan en la zona Z8.

