



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática

Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas

**Implementación de modelos numéricos en Python para
encontrar el número mínimo de intervenciones en el
mantenimiento de infraestructura vial de una empresa
de gestión de carreteras**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero de Sistemas

AUTOR

Yunior Efrain SOTO CORSINO

ASESOR

Jorge Luis CHÁVEZ SOTO

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Soto, Y. (2025). *Implementación de modelos numéricos en Python para encontrar el número mínimo de intervenciones en el mantenimiento de infraestructura vial de una empresa de gestión de carreteras*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática, Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	YUNIOR EFRAIN SOTO CORSINO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77799586
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0005-4590-063X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	JORGE LUIS CHÁVEZ SOTO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08675814
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9408-9266
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	JORGE SANTIAGO PANTOJA COLLANTES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06254022
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	JAVIER ELMER CABRERA DÍAZ
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08692591
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima

	Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Jr. Carlos Amezaga No. 375 Universidad Nacional Mayor de San Marcos Latitud: -12.0564232 Longitud: -77.0843327
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024
URL de disciplinas OCDE	2.02.04 -- Ingeniería de sistemas y comunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas

Acta Virtual de Sustentación
del Trabajo de Suficiencia Profesional

Siendo las 20:00 horas del día 10 de enero del año 2025, se reunieron virtualmente los docentes designados como Miembros de Jurado del Trabajo de Suficiencia Profesional, presidido por el Lic. Pantoja Collantes Jorge Santiago (Presidente), Mg. Cabrera Díaz Javier Elmer (Miembro) y el Lic. Chávez Soto Jorge Luis (Miembro Asesor), usando la plataforma Meet (<https://meet.google.com/seg-hqdz-yxf>), para la sustentación virtual del Trabajo de Suficiencia Profesional intitulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS EN PYTHON PARA ENCONTRAR EL NÚMERO MÍNIMO DE INTERVENCIONES EN EL MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURA VIAL DE UNA EMPRESA DE GESTIÓN DE CARRETERAS”**, por el Bachiller **Soto Corsino Yunior Efrain**; para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Sistemas.

Acto seguido de la exposición del Trabajo de Suficiencia Profesional, el Presidente invitó al Bachiller a dar las respuestas a las preguntas establecidas por los miembros del Jurado.

El Bachiller en el curso de sus intervenciones demostró pleno dominio del tema, al responder con acierto y fluidez a las observaciones y preguntas formuladas por los señores miembros del Jurado.

Finalmente habiéndose efectuado la calificación correspondiente por los miembros del Jurado, el Bachiller obtuvo la nota de **18 (DIECIOCHO)**.

A continuación el Presidente de Jurados el Lic. Pantoja Collantes Jorge Santiago, declara al Bachiller **Ingeniero de Sistemas**.

Siendo las 20:55 horas, se levantó la sesión.

Presidente

Lic. Pantoja Collantes Jorge Santiago

Miembro

Mg. Cabrera Díaz Javier Elmer

Miembro Asesor

Lic. Chávez Soto Jorge Luis



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, CHÁVEZ SOTO JORGE LUIS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 001059-2024-D-FISI/UNMSM y Oficio N° 009-PTTSP-FISI-2024 del Trabajo de Suficiencia Profesional cuyo título es Implementación de Modelos Numéricos en Python para Encontrar el Número Mínimo de Intervenciones en el Mantenimiento de Infraestructura Vial de una Empresa de Gestión de Carreteras, presentado por el bachiller SOTO CORSINO YUNIOR EFRAIN para optar el título de Ingeniera de Sistemas CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título.

Lima, 8 de enero de 2025

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: CHÁVEZ SOTO JORGE LUIS

DNI 08675814

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y mi esposa, agradezco por toda la comprensión y colaboración brindada en todo momento.

A mi madre, por siempre impulsarme a ser mejor y culminar con éxito mi carrera profesional y mi padre por darme el soporte necesario para superar obstáculos, a mi esposa por ser el guía en el camino hacia la superación y apoyarme para ser perseverante.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Prof. Jorge Luis Chávez Soto por sus valiosas y constructivas recomendaciones durante las etapas de planificación y ejecución de este proyecto de suficiencia profesional. La generosidad con la que ha dedicado su tiempo a brindarme su apoyo ha sido de gran valor y es profundamente apreciada.

Manifiesto mi más sincero agradecimiento al Prof. Pablo Jesús Romero Ñaupari por haberme otorgado la oportunidad de desarrollar este trabajo de suficiencia profesional, el cual constituye un paso fundamental para la obtención del título de Ingeniero de Sistemas.

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
Implementación de Modelos Numéricos en Python para Encontrar el Número
Mínimo de Intervenciones en el Mantenimiento de Infraestructura Vial de una
Empresa de Gestión de Carreteras

Autor: Soto Corsino, Yuniór Efraín

Asesor: Chávez Soto, Jorge Luis

Título: Trabajo de Suficiencia Profesional para optar el Título Profesional
de Ingeniero de Sistemas

Fecha: Diciembre de 2024

RESUMEN

La investigación titulada "Implementación de Modelos Numéricos en Python para Encontrar el Número Mínimo de Intervenciones en el Mantenimiento de Infraestructura Vial de una Empresa de Gestión de Carreteras" examina cómo optimizar el mantenimiento de tramos viales gestionados por una entidad de infraestructura. Dado que estas infraestructuras requieren intervenciones regulares para cumplir con parámetros de deflexión específicos, el estudio busca reducir la frecuencia de intervenciones, minimizando costos y maximizando la eficiencia. El objetivo es desarrollar un modelo numérico en Python que identifique los puntos de intervención óptimos mediante algoritmos de detección de picos en deflexiones y una función de costo ajustada. La metodología emplea técnicas como la detección de máximos, métodos topológicos y análisis de secciones, para zonificar con precisión los puntos críticos de intervención, integrando además datos geolocalizados y herramientas visuales para facilitar la interpretación y aplicación de resultados. Los hallazgos muestran que el modelo puede reducir en aproximadamente un 20% la cantidad de intervenciones, optimizando así la asignación de recursos y la

planificación de mantenimiento. El análisis de costos incluye factores como la distancia a canteras, proporcionando una estimación detallada de los costos operativos. En conclusión, esta implementación de modelos numéricos en Python demuestra ser una herramienta eficaz para la toma de decisiones en la optimización del mantenimiento de infraestructura vial, con un enfoque escalable y adaptable que promueve una gestión de activos más sostenible y eficiente.

Palabras claves: Optimización de mantenimiento, modelos numéricos, infraestructura vial, algoritmos en Python.

MAJOR NATIONAL UNIVERSITY OF SAN MARCOS
FACULTY OF SYSTEMS AND INFORMATICS ENGINEERING
PROFESSIONAL SCHOOL OF SYSTEMS ENGINEERING
Implementation of Numerical Models in Python to Find the Minimum Number of
Interventions in the Maintenance of Road Infrastructure of a Road Management
Company.

Author: Soto Corsino, Yuniór Efraín

Advisor: Chávez Soto, Jorge Luis

Title: Professional Sufficiency Work to opt for the Professional Title of
Systems Engineer

Date: Dicember 2024

ABSTRACT

The study titled "Implementation of Numerical Models in Python to Find the Minimum Number of Interventions in Road Infrastructure Maintenance for a Road Management Company" examines how to optimize the maintenance of road sections managed by an infrastructure entity. Given that these infrastructures require regular interventions to meet specific deflection parameters, the study seeks to reduce the frequency of interventions, minimizing costs and maximizing efficiency. The objective is to develop a numerical model in Python to identify optimal intervention points using peak-detection algorithms in deflections and an adjusted cost function. The methodology employs techniques such as peak detection, topological methods, and section analysis to accurately zone critical intervention points, integrating geolocated data and visual tools to facilitate interpretation and application of results. Findings show that the model can reduce interventions by approximately 20%, thus optimizing resource allocation and maintenance planning. The cost analysis includes factors such as distance to quarries, providing a detailed estimate of operational costs. In conclusion, this implementation of numerical models in Python proves to

be an effective decision-making tool for optimizing road infrastructure maintenance, with a scalable and adaptable approach that promotes more sustainable and efficient asset management.

Key words: Maintenance optimization, numerical models, road infrastructure, Python algorithms

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
CAPITULO I: TRAYECTORIA PROFESIONAL	5
CAPITULO II: CONTEXTO EN EL QUE SE DESARROLLA LA EXPERIENCIA	8
2.1. EMPRESA – ACTIVIDAD QUE REALIZA	8
2.2. VISIÓN	8
2.3. MISIÓN.....	9
2.4. ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA.....	9
2.5 ÁREA, CARGO Y FUNCIONES DESEMPEÑADAS	10
2.6. EXPERIENCIA PROFESIONAL REALIZADA EN LA ORGANIZACIÓN.....	11
CAPITULO III: ACTIVIDADES DESARROLLADAS.....	14
3.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	14
3.1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	15
3.2. SOLUCIÓN	15
3.2.1. OBJETIVOS	16
3.2.2. ALCANCE	17
3.2.3. ETAPAS DE METODOLOGÍA.....	18
3.2.4. FUNDAMENTOS UTILIZADOS.....	21
3.2.5 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ÁREAS, PROCESOS, SISTEMAS Y BUENAS PRÁCTICAS.....	33
3.3. EVALUACION.....	58
3.3.1. EVALUACIÓN ECONOMICA / EVALUACION COSTO BENEFICIO	58
3.3.2. INTERPRETACIÓN DEL VAN Y DEL TIR	58

CAPÍTULO IV. REFLEXIÓN CRÍTICA DE LA EXPERIENCIA.....	60
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
5.1 CONCLUSIONES.....	61
5.2 RECOMENDACIONES.....	62
5.3 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	63
5.4 ACRÓNIMOS	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de la Empresa	10
Figura 2 Diagrama de flujo de la implementación del proyecto.....	21
Figura 3 Medición de deflectometría.	23
Figura 4 Inyección con lechada de cemento	26
Figura 5 Proceso de Recapeo	27
Figura 6 Análisis topológico utilizando persistencia para la identificación de picos y valles en una serie de datos.	30
Figura 7 Análisis topológico utilizando persistencia para cuantificar la importancia de los máximos y mínimos en una serie de datos.....	31
Figura 8 Análisis de detección de picos y valles en una serie de datos utilizando findpeak	32
Figura 9 Representación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la planificación de intervenciones en carreteras.	33
Figura 10 Datos de deflexión obtenidos por deflectometría FWD.	36
Figura 11 Conjunto de datos cargado en un DataFrame utilizando la biblioteca pandas.	37
Figura 12 Selección de la columna de deflexión del conjunto de datos.	37
Figura 13 Cálculo de la deflexión característica y admisible.	38
Figura 14 Estado inicial de las deflexiones observadas, con líneas de referencia para la deflexión característica y admisible.	38
Figura 15 Instalación de bibliotecas para el análisis computacional.	40
Figura 16 Importación de bibliotecas en Google Colab.	41
Figura 17 Importación de funcionalidades específicas para el análisis.....	41
Figura 18 Picos y valles identificados mediante análisis topológico, facilitando la agrupación en zonas contiguas para optimizar intervenciones.	43
Figura 19 Relación entre niveles de nacimiento y muerte de características, clave para priorizar zonas de intervención eficiente.	44
Figura 20 Resultados del análisis de picos y valles con detalles de persistencia.....	44
Figura 21 Resultados de la metodología topológica para determinar el número de intervenciones necesarias.....	45

Figura 22 Configuración inicial de la deflexión característica y el factor de seguridad para la metodología máxima.....	45
Figura 23 Resultados iniciales del método máxima: reducción progresiva de la deflexión característica.	47
Figura 24 Resultados finales del método máxima: deflexión característica ajustada al límite admisible.	47
Figura 25 Detalle de los 135 puntos críticos identificados para intervención mediante el método máxima.	48
Figura 26 Aplicación de Intervenciones en Picos Prominentes.....	49
Figura 27 Conversión de coordenadas GMS a grados decimales utilizando Python.....	50
Figura 28 Visualización geoespacial de los puntos de intervención en formato de coordenadas geográficas.	50
Figura 29 Ubicación de puntos localizados por el algoritmo en un mapa libre para su lectura de QGIS.	51
Figura 30 Código implementado para exportar los puntos de intervención en formato SIG compatible.	52
Figura 31 Función de Costo del Proyecto.....	53
Figura 32 Tabla de progresivas con distancias y coordenadas, acompañada del costo total del proyecto.....	54
Figura 33 Estado de las deflexiones después de aplicar la metodología topológica con 233 intervenciones.	55
Figura 34 Comparación entre deflexiones originales y corregidas después de 135 intervenciones mediante el método máxima.....	56
Figura 35 Método de Secciones Prominentes con Corrección.	57

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Experiencia Laboral	5
Tabla 2 Formación y Certificados	7

INTRODUCCION

A nivel global, mantener las vías de transporte se ha convertido en una prioridad esencial para asegurar la conectividad y fomentar el desarrollo económico. Las carreteras no solo permiten el movimiento de personas y mercancías, sino que también son un recurso estratégico que influye en la competitividad de las naciones. De acuerdo con el Banco Mundial (2021), contar con una infraestructura vial eficiente es clave para un crecimiento económico sostenible. No obstante, factores como el deterioro acelerado por condiciones climáticas adversas y el aumento del tráfico han generado una carga considerable sobre estas infraestructuras, lo que se traduce en altos costos de mantenimiento. En los últimos cinco años, los gastos en mantenimiento vial han aumentado en un 30%, especialmente en áreas afectadas por climas extremos (Harvard Kennedy School, 2022). Esta situación ha llevado a gobiernos y empresas a buscar soluciones innovadoras, utilizando tecnologías como modelos numéricos y sistemas de monitoreo predictivo para optimizar las labores de mantenimiento.

En América Latina y el Caribe, la situación de las infraestructuras viales es especialmente preocupante. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2021), solo el 33% de las carreteras en la región están pavimentadas y más del 60% presentan un deterioro significativo. La alta dependencia del transporte terrestre en la economía latinoamericana incrementa la presión sobre estas vías, y el cambio climático acelera su deterioro. Eventos naturales como lluvias intensas y deslizamientos han dañado alrededor del 45% de las carreteras en la última década, elevando los costos de mantenimiento en más del 25% (UNDRR, 2021). Frente a esta realidad, varios países de la región han comenzado a implementar modelos predictivos y técnicas avanzadas de análisis de datos para optimizar las intervenciones de mantenimiento, logrando reducir costos sin sacrificar la calidad de las infraestructuras (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2022).

En Perú, la situación de las carreteras refleja desafíos similares, con más del 50% de las vías en malas condiciones, especialmente en zonas de alta altitud y áreas rurales (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2022). Este deterioro, junto con la falta de planificación y optimización en el mantenimiento, afecta directamente la seguridad vial y aumenta los costos operativos. Estudios recientes indican que el país

necesita una inversión acumulada de más de 2 mil millones de dólares para rehabilitar y mantener su red vial (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021). En este contexto, el uso de modelos numéricos y tecnologías de análisis de datos se presenta como una solución viable para anticipar el desgaste de las infraestructuras y optimizar la frecuencia de las intervenciones, alineándose con la necesidad de gestionar los recursos de manera eficiente.

Capítulo I: Trayectoria Profesional

Este capítulo destaca la experiencia profesional del autor en inteligencia de negocios, bases de datos y optimización de procesos, incluyendo roles en diversas empresas donde aplicó modelos analíticos y numéricos para mejorar la eficiencia operativa. Se muestra cómo estas habilidades se integran en el desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a la gestión vial.

Capítulo II: Contexto del Proyecto

Aquí se describe la empresa y su rol en consultoría para el sector de infraestructura vial, con un enfoque en estudios geotécnicos, topográficos e instrumentación. Este capítulo también aborda la misión y visión organizacional, así como la estructura organizacional, en la cual el autor se desempeña optimizando procesos y aplicando metodologías ágiles.

Capítulo III: Actividades Desarrolladas

Este capítulo plantea el problema de los altos costos y desgaste acelerado de las infraestructuras viales en la región, así como la necesidad de un modelo predictivo que permita optimizar las intervenciones. La solución implementada utiliza modelos numéricos para detectar puntos críticos de deflexión, establecer funciones de costo y generar visualizaciones geolocalizadas, facilitando la toma de decisiones.

Capítulo IV: Reflexión Crítica de la Experiencia

Este capítulo se describirá la experiencia adquirida, las lecciones aprendidas y se abordarán las deficiencias o limitaciones que surgieron durante el desarrollo del trabajo.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

Este capítulo se presentará las conclusiones en base al proyecto realizado de acorde a los problemas y objetivos planteados y se ofrecerán recomendaciones basadas en dichas conclusiones del proyecto.

CAPITULO I: TRAYECTORIA PROFESIONAL

El autor de este trabajo posee el grado de Bachiller en Ingeniería de Sistemas y cuenta con más de tres años de experiencia en inteligencia de negocios, gestión de bases de datos, análisis de información y optimización de procesos. Ha manejado grandes volúmenes de datos, desarrollando habilidades en la resolución de problemas, adaptación al cambio y trabajo en equipo. Su trayectoria profesional abarca tanto el sector público como el privado, destacándose especialmente en empresas de ingeniería y construcción del sector privado. En estos roles, ha aplicado sus conocimientos para mejorar la eficiencia operativa mediante el uso de modelos analíticos y numéricos. Esta experiencia le ha permitido combinar técnicas avanzadas de análisis de datos con prácticas efectivas de gestión de recursos en proyectos de infraestructura y tecnología, lo que se resume en la siguiente tabla 1:

Tabla 1
Experiencia Laboral

Empresa de Geoingeniería	
Oct 2024 – Actualidad	
Cargo	Analista de Sistemas
Funciones	- Análisis y optimización de procesos de la empresa. - Administrador de la infraestructura TI de la empresa. - Programación y configuración de equipos de instrumentación y Dataloggers
Empresa de Ingeniería y Construcción	
Ene 2024 – Jun 2024	
Cargo	Analista de Información
Funciones	- Lideré el desarrollo y gestión de una base de datos específica para el área de Recursos Humanos, optimizando la administración de datos de empleados en proyectos de construcción. - Implementé soluciones automatizadas utilizando Business Intelligence (SSIS), SQL Server y programación en VBA para Excel. - Creé dashboards interactivos en Power BI para la visualización de datos, permitiendo a la gerencia de la constructora tomar decisiones estratégicas

	basadas en datos en tiempo real.
	- Investigación y consultaría en análisis de datos a empresas externas.
Ministerio Público y Fiscalía de la Nación	
Jun 2022 – Dic 2023	
Cargo	Analista de Información
Funciones	- Implementé y optimicé procesos para el registro, validación y verificación de datos en el sistema de Declaraciones Juradas para los años fiscales 2019-2022, utilizando técnicas de validación de datos y asegurando la integridad y exactitud de la información. - Diseñé y mantuve la estructura de la base de datos DJIBR, aplicando principios de normalización y optimización de consultas en SQL para garantizar la eficiencia en el almacenamiento y recuperación de datos. - Desarrollé y mantuve dashboards interactivos en Power BI para el análisis de datos sobre el personal omiso (2019-2022), utilizando modelado de datos y visualización para proporcionar informes detallados y accesibles a nivel nacional. - Utilicé Power Query para realizar la transformación, limpieza y preparación de datos relacionados con nombramientos y contratos (2019-2022), aplicando técnicas de ETL, para mejorar la calidad y consistencia de los datos.
Innova Perú Ingeniería y Construcción S.A.C	
Ene 2021 – Jun 2022	
Cargo	Asistente de Información
Funciones	- Mejoré la utilidad de la información mediante el desarrollo de dashboards, aumentando la eficiencia en la supervisión de proyectos. - Apoyé a la gestión de datos para generar reportes mensuales, utilizando técnicas de análisis de datos para asegurar la exactitud y relevancia de la información presentada. - Elaboré flujos de procesos, guías de usuario y presentaciones sobre diagnósticos y propuestas de mejora y análisis de procesos para optimizar la eficiencia y la comunicación interna.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2*Formación y Certificados*

Año	Formación Académica y Certificados
2024 – 2024	ENCAP – Excel y Power BI Análisis y Visualización de Datos
2024 – 2024	Kaggle – Programación Python
2024 – 2024	ESIEP – Microsoft Office Excel nivel Avanzado
2024 – 2024	Fundación Telefónica – Gobierno y gestión de la seguridad de la información
2023 – 2023	Fundación Telefónica – Gestión de Proyectos con Metodologías Ágiles y Enfoques Lean
2023 – 2023	Sistemas UNI – SQL Server 2016 Administración
2023 – 2023	ENCAP – Gestión Pública

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO II: CONTEXTO EN EL QUE SE DESARROLLA LA EXPERIENCIA

2.1. EMPRESA – ACTIVIDAD QUE REALIZA

La empresa se especializa en ofrecer servicios de consultoría para el sector minero, de transporte y otros sectores, en estudios geotécnicos que incluyen investigaciones de campo mediante perforaciones diamantinas, excavación de calicatas, y diversos ensayos (SPT, CPT, DPL, y pruebas de permeabilidad en suelos y rocas). Además, realiza muestreo y análisis geotécnicos para evaluar estabilidad de taludes, diseñar presas de agua, evaluar cimentaciones y analizar el potencial de licuación y sismicidad. También desarrolla estudios de evaluación de riesgos y estudios geofísicos mediante métodos sísmico, eléctrico, electromagnético y térmico, así como testificación de pozos. En instrumentación geotécnica, ofrece servicios de instalación, diseño, supervisión y toma de lecturas. Asimismo, realiza trabajos de topografía, geodesia y fotogrametría, que incluyen levantamientos con estación total, actualizaciones cartográficas, georreferenciación, levantamiento y replanteo con RTK, nivelación, certificación de puntos geodésicos, creación de redes geodésicas, levantamientos con drones y levantamientos 3D con tecnología Lidar. Adicionalmente, brinda ensayos de laboratorio, servicios de reparación y calibración, y comercializa equipos de instrumentación geotécnica para el sector público, privado, minero y de transporte. (Empresa de Geoingeniería, 2024)

2.2. VISIÓN

Somos una empresa peruana dedicada a ofrecer servicios y asesoría integral en la realización de estudios geotécnicos, geofísicos, hidrogeológicos, geológicos, geomorfológicos, topográficos, instrumentación geotécnica, así como en la reparación y calibración de equipos de instrumentación. Nos enfocamos en la satisfacción de nuestros clientes, preservando el medio ambiente y cumpliendo con los objetivos de la empresa y de nuestros colaboradores. (Empresa de Geoingeniería, 2024)

2.3. MISIÓN

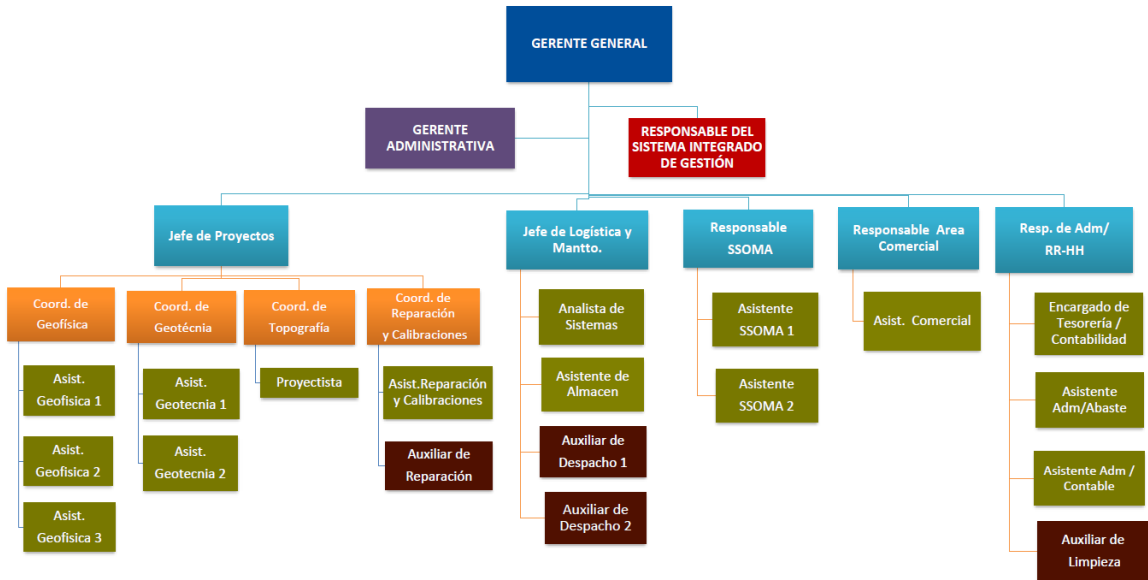
Convertirnos en una empresa de altos estándares de calidad e innovación, mediante la implementación de sistemas de gestión de calidad, ambiental, y de seguridad y salud en el trabajo, para ofrecer servicios especializados en consultoría, supervisión, instrumentación y reparación de equipos geotécnicos. Continuar representando a la marca canadiense RST INSTRUMENTS y otras marcas de renombre mundial. (Empresa de Geingeniería, 2024)

2.4. ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA

La empresa está organizada bajo la guía del Gerente General, quien coordina y supervisa las áreas clave que mantienen en marcha nuestras operaciones: Administración, Proyectos, SSOMA (Seguridad y Salud), Área Comercial y Administración de Recursos Humanos, Logística y Mantenimiento donde se realizó el proyecto. Esta estructura se refleja en el organigrama de la empresa que aparece en la Figura 1.

Figura 1

Organigrama de la Empresa



Nota. El organigrama muestra la estructura organizacional de la empresa (Empresa de Geingeniería, 2024).

2.5 ÁREA, CARGO Y FUNCIONES DESEMPEÑADAS

En este informe de suficiencia profesional, el autor ocupa el puesto de Analista de Sistemas en el Área de Logística y Mantenimiento, donde se encarga de administrar la infraestructura tecnológica de la empresa. Su labor en el proyecto se centra en mejorar y optimizar los procesos mediante el análisis de datos.

Uno de los proyectos más destacados en los que participó fue para un cliente dedicado a la gestión de carreteras, con el objetivo de optimizar el mantenimiento de la infraestructura vial. Para lograr esto, implementó modelos numéricos en Python que permitieron identificar la cantidad mínima de intervenciones necesarias. Esto no solo ofreció una alternativa eficiente para el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras, sino que también ayudó a reducir costos.

Aunque no se utilizó formalmente la metodología Scrum, se aplicó un enfoque similar para gestionar y supervisar el avance del proyecto. Se organizaron reuniones periódicas

con el cliente externo para presentar los avances y los entregables. En estas reuniones, se revisaba el progreso del proyecto, se aseguraba que se cumpliera con el alcance acordado previamente y se realizaban los ajustes necesarios para cumplir con los plazos de entrega. De esta manera, el cliente estuvo siempre informado sobre los hitos importantes del proyecto.

2.6. EXPERIENCIA PROFESIONAL REALIZADA EN LA ORGANIZACIÓN

Dentro de la empresa de geoingeniería, el autor ha participado en diversos proyectos significativos, desempeñando distintos roles y asumiendo variadas responsabilidades en cada uno de ellos. A continuación, se describen estos proyectos:

- Dashboard para Monitoreo en Tiempo Real:

Participó en el equipo encargado de desarrollar un panel de control (dashboard) que muestra los datos de los dataloggers en tiempo real. Gracias a esta herramienta, el equipo puede monitorear el estado de los equipos en el campo, identificar rápidamente cualquier problema y reaccionar de manera ágil, lo que ha mejorado considerablemente la capacidad de respuesta ante imprevistos.

- Sistema Predictivo para Mantenimiento:

El autor participó en la creación de un sistema predictivo que utiliza datos históricos para prever cuándo un equipo podría requerir mantenimiento. Esta solución ha permitido al equipo de mantenimiento tomar decisiones anticipadas antes de que surjan problemas, reduciendo los tiempos de inactividad y facilitando una mejor planificación de los recursos. Como resultado, se ha logrado una gestión más eficiente.

- Sistema de Control de Inventario Automatizado:

En el área de inventarios, el autor formó parte del equipo que implementó un sistema de control automatizado utilizando tecnología RFID y códigos QR. Este sistema ha simplificado el seguimiento y la organización del inventario, garantizando que cada equipo esté disponible y en óptimas condiciones cuando se requiere en los proyectos. Como resultado, la gestión del almacén se ha vuelto más ágil y eficiente.

- Análisis del Rendimiento de Equipos:

Colaboró con sus colegas en el desarrollo de un sistema de análisis que evalúa el rendimiento de los equipos de instrumentación basándose en su historial de uso y en el entorno en el que operan. Esta herramienta permite identificar patrones de desgaste y planificar el mantenimiento de manera anticipada, asegurando que los equipos funcionen al máximo de su capacidad y prolongando su vida útil.

- Sistema de Reportes Automatizados:

El autor formó parte del equipo que desarrolló un sistema para la generación automática de informes de proyectos en curso. Esta solución recopila y organiza datos directamente de los sensores en el campo, creando reportes precisos y actualizados que facilitan la comunicación y el seguimiento de los proyectos. De esta manera, se ahorra tiempo y se garantiza la calidad de la información.

- Modelo para Identificación de Patrones de Fallo en Equipos:

Formó parte del equipo que creó un modelo de análisis para detectar patrones de fallas recurrentes en los equipos de instrumentación. Este sistema permite prever problemas antes de que se presenten, reduciendo así la necesidad de reparaciones y optimizando la vida útil de los equipos, lo que genera un ahorro significativo en costos.

Esta experiencia dentro de la organización permitió al autor realizar una contribución significativa al proyecto de implementación de modelos numéricos, cuyo objetivo era identificar la cantidad mínima de intervenciones necesarias para

el mantenimiento de la infraestructura vial. Para ello, se emplearon metodologías avanzadas que facilitaron la detección de puntos críticos de intervención, optimizando los recursos disponibles y mejorando la eficiencia en la gestión del mantenimiento vial.

CAPITULO III: ACTIVIDADES DESARROLLADAS

3.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Actualmente, el mantenimiento de infraestructuras exige una gran cantidad de recursos, y la falta de un modelo optimizado puede llevar a realizar intervenciones ya sea en exceso o de manera insuficiente. Esto incrementa los costos y los tiempos de ejecución sin asegurar la efectividad necesaria.

El proyecto llevado a cabo para una empresa de gestión de carreteras, enfocado en el mantenimiento de la infraestructura vial, tiene como objetivo optimizar tanto la cantidad como la ubicación de las intervenciones necesarias para mantener la operatividad y seguridad de la carretera en dos tramos específicos. Estos tramos presentan condiciones geográficas y estructurales diversas, lo que requiere un análisis detallado de los puntos críticos que necesitan intervención para garantizar la funcionalidad de la vía y reducir los costos de mantenimiento.

La empresa de gestión de carreteras enfrenta el desafío de optimizar el mantenimiento de su infraestructura vial, reduciendo la frecuencia de las intervenciones para cumplir con los parámetros de deflexión establecidos y asegurar la durabilidad de los tramos viales. Además, debe optimizar el uso de recursos en un contexto de alta demanda de transporte y movilidad. En este sentido, es necesaria una metodología eficiente que permita identificar con precisión los puntos específicos donde se deben realizar intervenciones, garantizando la efectividad de las reparaciones y el uso adecuado de los recursos disponibles.

3.1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Problema principal

El problema principal en el proyecto es determinar el número mínimo de puntos de intervención necesarios para mantener la funcionalidad y seguridad del mantenimiento de la infraestructura vial en diferentes tramos de la carretera, cumpliendo con los estándares de deflexión requeridos.

Problemas específicos

1. Existe la necesidad de identificar el número mínimo de intervenciones que aseguren el mantenimiento óptimo de la infraestructura vial, lo que permite reducir significativamente los costos operativos sin comprometer la seguridad y funcionalidad de la carretera.
2. La ausencia de una función de costos bien definida dificulta la estimación precisa de los gastos asociados al mantenimiento de carreteras, lo que puede llevar a una planificación financiera ineficiente y a sobrecostos en el proyecto.
3. La falta de integración de datos geoespaciales precisos y herramientas de visualización limita la capacidad de planificar y ejecutar intervenciones de mantenimiento de manera eficiente y efectiva.
4. La utilización ineficiente de los recursos disponibles debido a la falta de priorización de las secciones críticas de la carretera puede llevar a intervenciones menos efectivas y al desperdicio de recursos financieros y materiales.
5. Existe una necesidad de alternativas innovadoras en el mantenimiento vial que sean sostenibles y que contribuyan de manera significativa a la ingeniería y a la sociedad, superando enfoques tradicionales y reactivos.

3.2. SOLUCIÓN

La solución propuesta para enfrentar este desafío se basa en desarrollar un modelo computacional que analice y detecte de manera optimizada los puntos donde se debe intervenir. Este modelo integra tanto los costos de mantenimiento como la efectividad de

las intervenciones. Su objetivo principal es determinar el número mínimo de intervenciones necesarias mediante el análisis de datos de deflexión y el uso de funciones de costos, lo que permite priorizar y seleccionar los puntos de intervención en los tramos de la carretera.

Este enfoque combina diversas metodologías para identificar puntos críticos, como la detección de picos máximos, el análisis topológico y la segmentación por secciones. De esta manera, se obtiene una visión completa y precisa de los tramos que requieren intervención. Además, el modelo incorpora una función de costos que evalúa y optimiza tanto los costos fijos como los variables asociados a las intervenciones. Esto facilita la toma de decisiones basadas en criterios de eficiencia y seguridad, asegurando el uso adecuado de los recursos disponibles.

3.2.1. OBJETIVOS

Objetivo General

Implementar modelos numéricos en Python que permita encontrar el número mínimo de intervenciones en el mantenimiento de infraestructura vial, mostrando una alternativa para la empresa de gestión vial evaluando para la reducción de los costos y mejorando la eficiencia operativa de una empresa de gestión de carreteras.

Objetivos Específicos

1. Desarrollar e implementar un modelo computacional que permita determinar el número mínimo de intervenciones necesarias para mantener las condiciones óptimas de la carretera, logrando una reducción significativa en los costos operativos.
2. Diseñar e implementar una función de costos que evalúe de manera precisa los costos fijos y variables de cada intervención, proporcionando una aproximación confiable del costo total del proyecto de mantenimiento vial mediante inyecciones.

3. Integrar coordenadas geográficas precisas y desarrollar herramientas de visualización geoespacial dentro del modelo computacional para mejorar la planificación y ejecución de las intervenciones de mantenimiento vial.
4. Aplicar técnicas avanzadas de análisis de deflexiones y metodologías de priorización para identificar y enfocarse en las secciones críticas de la carretera, maximizando la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles.
5. Implementar y evaluar un sistema computacional que ofrezca una alternativa sostenible para el mantenimiento vial, contribuyendo significativamente al campo de la ingeniería y proporcionando beneficios sociales a través de la mejora de la infraestructura carretera.

3.2.2. ALCANCE

Alcance Funcional

El alcance funcional del proyecto se enfoca en desarrollar un modelo computacional que identifique el número mínimo de puntos de intervención necesarios en la infraestructura vial. Mediante el análisis de datos de deflexión y la optimización de costos, el modelo podrá detectar los puntos críticos que requieren intervenciones estructurales, con el objetivo de reducir el costo total de mantenimiento. Además, el proyecto incorporará herramientas de visualización geoespacial para mapear estos puntos de intervención en plataformas como QGIS. Esto facilitará la toma de decisiones y la planificación de intervenciones continuas en las zonas críticas de la carretera.

Alcance Organizacional

Desde una perspectiva organizacional, el proyecto requiere la colaboración de varios equipos dentro de la empresa de gestión de carreteras. El equipo técnico será responsable de recolectar datos mediante mediciones de deflectometría, como se muestra en la figura 3, y de realizar las intervenciones de inyección en los puntos seleccionados. Posteriormente, el equipo de ingenieros civiles utilizará el modelo desarrollado para optimizar la selección de los puntos críticos. Además, se coordinará

con proveedores de materiales y servicios logísticos para asegurar la disponibilidad de insumos necesarios en áreas de difícil acceso. La supervisión del proyecto estará a cargo de un equipo administrativo que evaluará el progreso y el cumplimiento de los objetivos, garantizando una implementación eficiente y coordinada de las intervenciones.

Alcance Tecnológico

Desde una perspectiva tecnológica, la implementación utilizará diversas herramientas para garantizar la eficacia del modelo computacional y de las metodologías de detección. El desarrollo del modelo se llevará a cabo en Python, empleando bibliotecas como Numpy, Pandas y Scipy para el procesamiento de datos y el cálculo de deflexión. Por otro lado, QGIS se utilizará para la visualización geoespacial de los puntos de intervención. Además, una plataforma en la nube permitirá la ejecución y el acceso a los datos desde cualquier ubicación, fomentando una colaboración fluida entre los equipos y facilitando ajustes en tiempo real en el modelo.

Asimismo, se integrarán bases de datos de deflexión y datos geográficos para lograr un análisis detallado y preciso. Este conjunto de tecnologías asegura que el modelo pueda detectar, optimizar y mapear los puntos críticos en los tramos de la Carretera Andina del SUR. De esta manera, se contribuye a una solución rentable que maximiza la seguridad y la estabilidad de la infraestructura vial.

3.2.3. ETAPAS DE METODOLOGÍA

El proyecto para optimizar la identificación de las áreas que necesitan intervenciones en la infraestructura vial se llevará a cabo en seis fases. Cada una de estas etapas permitirá avanzar de forma ordenada, comenzando con la recolección de datos y llegando hasta la ejecución estratégica de mejoras en los puntos más críticos de la carretera.

Etapas 1: Recolección y Preparación de Datos

En esta etapa inicial, se recopilarán los datos necesarios de deflexión y condiciones

geográficas de los tramos de la carretera en estudio. Estos datos incluirán registros detallados de deflexión, información topográfica, características del terreno y otros datos relevantes sobre el estado estructural de la carretera. Los datos recopilados serán limpiados y organizados en un formato adecuado para garantizar su precisión y facilitar su procesamiento en el modelo computacional.

Etapas 2: Desarrollo del Modelo Computacional

En esta segunda etapa, se diseñará y desarrollará el modelo computacional en Python, configurado para analizar los datos de deflexión de la carretera. El modelo integrará tres metodologías específicas para la detección de puntos de intervención:

1. **Metodología de Picos Máximos (Máxima):** Esta metodología se centra en la detección de picos locales de deflexión en la carretera. Mediante el análisis de máximos locales, el modelo identificará los puntos de mayor deflexión en el tramo, priorizando aquellos que requieren una intervención inmediata. Esta metodología es útil para identificar puntos individuales de alta deflexión que son críticos para la estabilidad de la carretera.
2. **Metodología Topológica:** Esta metodología utiliza un enfoque avanzado basado en la persistencia de picos, lo cual permite agrupar zonas de picos contiguos. A diferencia de los picos máximos individuales, la metodología topológica detecta "islas" de deflexión donde múltiples picos forman una zona de intervención continua. Este enfoque es especialmente valioso para reducir costos al optimizar las intervenciones en áreas amplias donde es más eficiente trabajar en conjunto en lugar de realizar reparaciones aisladas.
3. **Metodología de Secciones:** Esta metodología examina los datos de deflexión en intervalos concretos, lo que permite detectar picos dentro de secciones específicas de la carretera. Al establecer un "ancho" o ventana para el análisis, el modelo puede identificar con mayor precisión los patrones de deflexión que requieren intervención, garantizando que se actúe solo en los tramos necesarios. Este enfoque es particularmente útil para estudiar segmentos homogéneos de la vía y

se puede combinar con métodos topológicos que ayuden a localizar zonas con deflexión persistente.

Estas tres metodologías permiten que el modelo tenga una capacidad analítica robusta y adaptada a la variabilidad geográfica y estructural de la carretera. El objetivo en esta etapa es desarrollar un modelo flexible y preciso que combine estas metodologías para identificar y priorizar los puntos de intervención de forma eficiente.

Etapas 3: Análisis y Optimización de Puntos de Intervención

En esta etapa, se realizará un análisis exhaustivo de los puntos de intervención detectados. En esta etapa, se evaluará la criticidad de cada punto, priorizando aquellos donde la aplicación de inyecciones estructurales resulte más efectiva. Además, se optimizará la agrupación de puntos de intervención contiguos para reducir costos logísticos y operativos, maximizando la eficiencia del proceso de mantenimiento.

Etapas 4: Visualización de Resultados en QGIS

Los puntos de intervención seleccionados serán visualizados en QGIS, permitiendo su representación geoespacial en el contexto de la carretera. Esta visualización facilitará la interpretación de los datos y ayudará al equipo de la empresa de gestión de carreteras en la planificación y ejecución de las intervenciones, brindando una representación clara y detallada de los puntos críticos de la carretera.

Etapas 5: Implementación de la Función de Costos

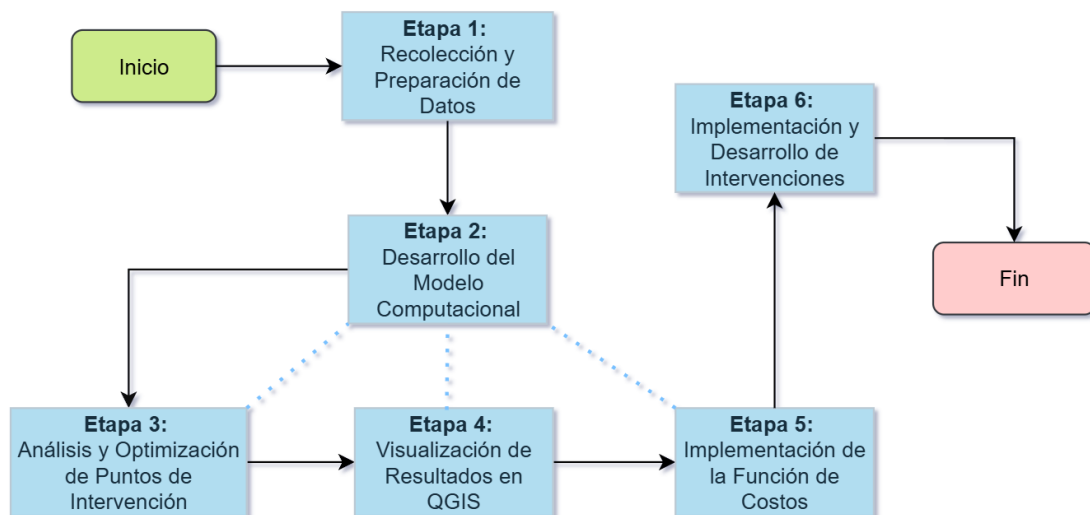
En esta etapa, se integrará una función de costos en el modelo computacional, la cual evaluará tanto los costos fijos como los variables asociados a cada intervención. Esta función de costos tomará en cuenta factores como la distancia a las canteras y el tipo de intervención para optimizar la selección de puntos de intervención que ofrezcan la mejor relación costo-efectividad, maximizando así el uso eficiente del presupuesto asignado al proyecto.

Etapa 6: Implementación y Desarrollo de Intervenciones

En la última etapa, se llevarán a cabo las intervenciones mediante la aplicación de inyecciones estructurales en los puntos seleccionados. Las intervenciones se planificarán de manera que se realicen de forma continua y organizada, permitiendo una gestión eficiente del tiempo y los recursos en cada tramo de la carretera.

Figura 2

Diagrama de flujo de la implementación del proyecto



Nota. Se realiza la presentación de etapas de la implementación del proyecto.

3.2.4. FUNDAMENTOS UTILIZADOS

Entre las principales bases teóricas utilizadas tenemos:

A. Deflexión en Infraestructura Vial

La deflexión en una infraestructura vial es la deformación vertical que sufre un pavimento cuando soporta el peso del tráfico, y es un indicador esencial de su resistencia estructural. Para medirla de forma precisa y sin causar daños, se emplea el Deflectómetro de Impacto

de Carga Descendente (Falling Weight Deflectometer, FWD). Este instrumento aplica una carga dinámica que imita el efecto del paso de un vehículo sobre la superficie del pavimento. Al hacerlo, registra las deformaciones en distintos puntos, creando una “cuenca de deflexión” que muestra cómo se distribuye la deformación a lo largo del pavimento.

El análisis de los datos obtenidos con el FWD permite estimar la rigidez de las distintas capas del pavimento, lo que resulta clave para evaluar su integridad estructural. Gracias a estos datos, se pueden planificar de forma más acertada las tareas de mantenimiento o rehabilitación, optimizando así el uso de recursos. Además, el método es ampliamente reconocido por su precisión y eficiencia, convirtiéndose en una herramienta fundamental en la gestión de las infraestructuras viales.

El FWD también desempeña un papel crucial en la verificación de la calidad de pavimentos nuevos, al comprobar su capacidad de carga y su desempeño bajo condiciones reales de operación. Su uso contribuye a una administración más efectiva de la red vial, maximizando la utilidad de las carreteras y garantizando su seguridad y durabilidad a largo plazo.

Figura 3

Medición de deflectometría.



Nota. La imagen muestra el proceso de medición de las deflexiones. Tomado de un informe interno proporcionado por una empresa de gestión vial, 2023. Uso autorizado.

Tipos de deflexión

- **Deflexión obtenida por medición deflectométrica**

La deflexión es la deformación vertical que experimenta un pavimento cuando soporta una carga. Para medir esta deformación, se utilizan equipos especializados, como la viga Benkelman, que registran la respuesta elástica del pavimento ante cargas controladas. Gracias a este método no destructivo, es posible evaluar con precisión la capacidad estructural del pavimento y detectar posibles puntos débiles en su estructura (Bravo Silvestre, 2020).

- **Deflexión característica**

La deflexión característica es un valor estadístico que refleja la deflexión promedio del pavimento, teniendo en cuenta la variabilidad de las mediciones

realizadas en el campo. Para calcularla, se parte de la deflexión media y se le suma un factor relacionado con la desviación estándar, el cual suele estar asociado a un nivel de confianza del 95%. Este parámetro resulta esencial para evaluar la uniformidad estructural del pavimento y, en consecuencia, planificar de manera más acertada las intervenciones de mantenimiento (Farfán Buendía, 2022).

- **Deflexión admisible**

La deflexión admisible es la máxima deformación vertical que un pavimento puede soportar sin poner en riesgo su resistencia a lo largo de su vida útil. Para determinar este valor, se toman en cuenta el tipo y volumen de tráfico previsto, así como las características del pavimento y el suelo que lo sustenta. En el Perú, se han desarrollado metodologías específicas adaptadas a las condiciones locales de tráfico y clima, con el fin de establecer adecuadamente la deflexión admisible (Farfán Buendía, 2022).

B. Inyección de Lechada de Cemento en Suelo

La inyección de lechada de cemento en suelos es una técnica muy empleada en ingeniería geotécnica para mejorar las condiciones del terreno. Este método consiste en introducir, a una presión cuidadosamente controlada, una mezcla fluida de cemento y agua conocida como lechada en el suelo. El objetivo principal es aumentar la resistencia del terreno, hacerlo menos deformable y disminuir su permeabilidad, contribuyendo así a que la superficie sea más estable y capaz de soportar mayores cargas (Keller, 2023).

Existen diferentes tipos de inyección, cada uno adaptado a las características del suelo y a las necesidades del proyecto:

1. **Inyección de impregnación:** Se realiza a baja presión para rellenar poros y fisuras, reduciendo la permeabilidad del suelo y aumentando su cohesión (Keller, 2023).
2. **Inyección de compactación:** Se emplea a presiones moderadas para densificar el

suelo, incrementando su capacidad portante (Cimenter, 2023).

3. **Inyección de fracturación:** Utiliza altas presiones para fracturar el terreno, permitiendo que la lechada penetre en las fisuras creadas, formando una red que incrementa la rigidez y resistencia estructural (Soletanche Bachy, 2023).

La selección del tipo de inyección depende de un análisis detallado del terreno y de los objetivos específicos del proyecto. Este procedimiento es esencial para mitigar riesgos de asentamientos diferenciales, mejorar la estabilidad estructural y reducir los problemas asociados con la infiltración de agua (CIMSUR, 2023).

Entre las principales ventajas de la inyección de lechada de cemento se encuentran:

- **Mejora de la resistencia y capacidad portante:** Consolidando partículas del suelo, se incrementa su resistencia y se minimizan los asentamientos diferenciales (CIMSUR, 2023).
- **Reducción de la permeabilidad:** Al rellenar poros y fisuras, la lechada disminuye significativamente la infiltración de agua, mejorando la estabilidad del terreno (CIMSUR, 2023).
- **Versatilidad:** Es una técnica aplicable a diversos tipos de suelo, como arenas, limos y arcillas, siendo una solución flexible en múltiples contextos geotécnicos (CIMSUR, 2023).

La efectividad de este método depende de una ejecución cuidadosa y de una supervisión experta, prestando especial atención a factores como la presión de inyección, la consistencia de la lechada y su capacidad para penetrar en el terreno. En definitiva, la inyección de lechada de cemento es una solución confiable y versátil para abordar problemas de estabilidad y capacidad de carga en proyectos de infraestructura.

Figura 4

Inyección con lechada de cemento.



Nota. La imagen muestra el proceso de corrección mediante inyección con lechada de cemento. Extraído de un informe interno proporcionado por una empresa de gestión vial, 2023. Uso autorizado.

C. Recapeo Asfáltico en el Mantenimiento de Infraestructura Vial

El recapeo es una técnica de mantenimiento vial que consiste en colocar una nueva capa de mezcla asfáltica sobre un pavimento ya existente. Con este procedimiento, se busca prolongar la vida útil de las carreteras, mejorando su calidad de rodadura, resistencia y seguridad. Además, el recapeo resulta especialmente útil para corregir fisuras, deformaciones y el desgaste que se acumula en la superficie con el paso del tiempo.

Entre sus beneficios destacan:

- Restaurar la capacidad estructural, distribuyendo eficientemente las cargas vehiculares.
- Mejorar la funcionalidad superficial mediante la corrección de irregularidades y el incremento del confort en la conducción.

- Proteger las capas inferiores del pavimento al prevenir la infiltración de agua.
- Ofrecer una solución económica y eficiente comparada con la reconstrucción total de la vía.

El recapeo cumple un rol esencial tanto en el mantenimiento preventivo como en el correctivo de las vías, sobre todo en zonas con niveles de tráfico moderados o bajos, donde se buscan soluciones económicas y de rápida ejecución. Para que este proceso resulte exitoso, es imprescindible evaluar con cuidado el estado del pavimento y garantizar la calidad de los materiales empleados (Apaza Navarro, 2023).

Figura 5

Proceso de Recapeo



Nota. La imagen muestra el proceso de Recapeo en la carretera Santiago de Chuco - Mollepata. Adaptado de MTC (2021).

D. Análisis de Costos en Infraestructura Vial

El análisis de costos en proyectos de infraestructura vial es fundamental para una planificación y ejecución eficientes. Una fórmula comúnmente empleada para estimar el costo total de una intervención es:

$$\text{Costo Total} = 0.9 \times \text{Costo Fijo} + \sum_{i=1}^n \text{Distancia de Intervención}[i]$$

En esta expresión:

- **Costo Fijo:** Representa los gastos constantes asociados al proyecto, como la movilización de equipos, permisos y otros costos que no varían con la distancia o el alcance de la intervención.
- **Distancia de Intervención:** Corresponde a la longitud específica de cada sección vial donde se realizarán trabajos de mantenimiento o reparación.

Aplicar un factor multiplicativo de 0.9 al Costo Fijo indica que se están considerando posibles eficiencias operativas o beneficios derivados de las economías de escala. Por otro lado, al sumar las distancias de intervención se obtiene una medida de la extensión total de las zonas de trabajo, lo que impacta directamente en los costos variables, como el uso de materiales y la mano de obra (Gómez et al., 2021).

Este modelo matemático ofrece una estimación más precisa de los costos, ajustándose a las particularidades de cada proyecto. De acuerdo con Gómez et al. (2021), utilizar un enfoque matemático basado en datos para fijar los costos mejora la distribución de los recursos y hace más eficiente la planificación de las intervenciones viales.

E. Modelos Matemáticos Utilizados

El proyecto se apoya en varios modelos matemáticos para optimizar las intervenciones de mantenimiento. A continuación, se detalla cómo se aplican estos modelos y sus implicaciones en el análisis y toma de decisiones.

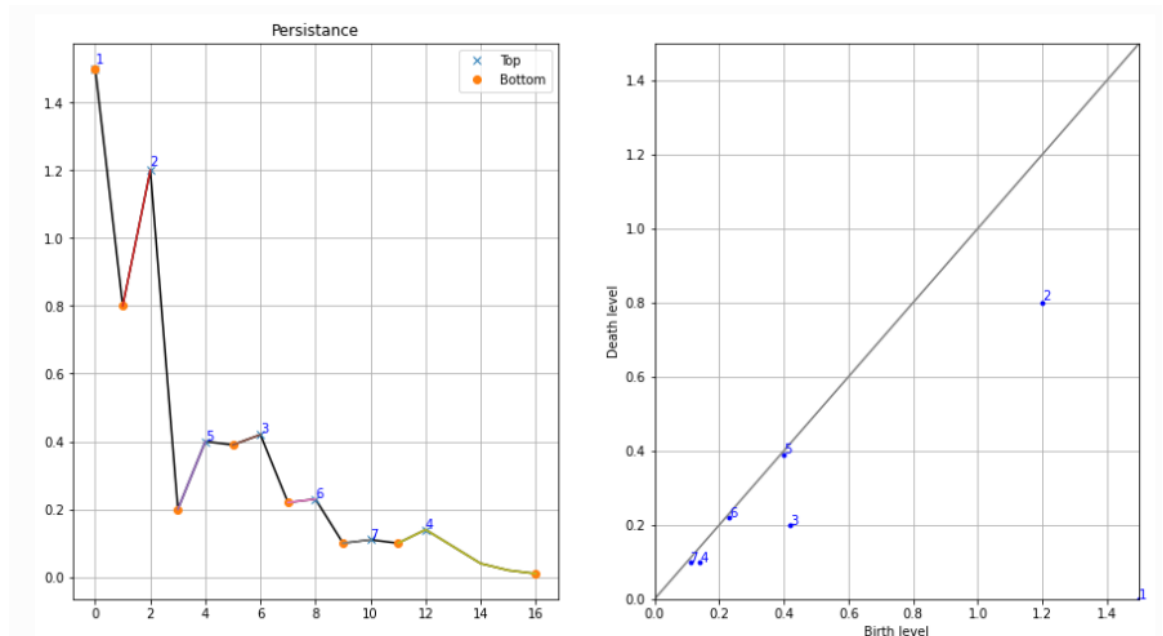
- **Método Topológico**

El análisis topológico de datos (TDA, por sus siglas en inglés) es una técnica que identifica patrones importantes en conjuntos de datos al examinar su estructura matemática. Este enfoque se emplea con frecuencia para detectar picos y valles, facilitando la localización de áreas críticas en infraestructuras viales, por ejemplo, zonas con valores extremos de deflexión. Según Cohen-Steiner, Edelsbrunner y Harer (2007), la homología persistente es una herramienta esencial dentro del TDA, ya que permite extraer características relevantes de los datos y evaluar su importancia.

Además, existen métodos computacionales para el análisis topológico, como el algoritmo Mapper, que resultan sumamente útiles para representar y analizar de forma visual la compleja estructura de la información. Estas herramientas han demostrado ser eficaces en la evaluación de deflexiones viales, ayudando a determinar qué zonas requieren atención prioritaria en el mantenimiento de la infraestructura.

Figura 6

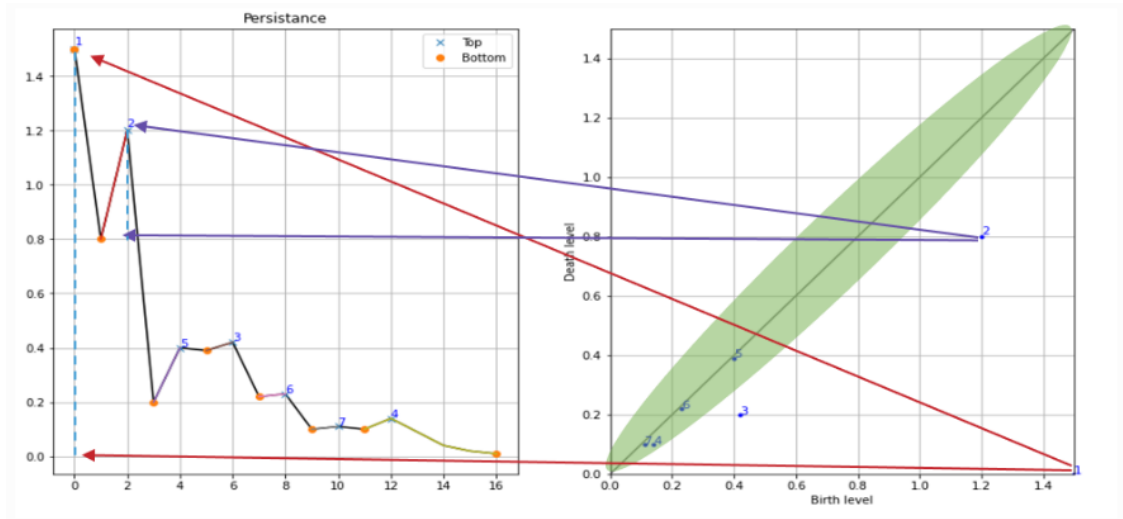
Análisis topológico utilizando persistencia para la identificación de picos y valles en una serie de datos.



Nota. La figura muestra la relación entre picos y valles (gráfica izquierda) y su persistencia en el dominio de nacimiento y desaparición (gráfica derecha), útil para determinar características prominentes en la serie de datos

Figura 7

Análisis topológico utilizando persistencia para cuantificar la importancia de los máximos y mínimos en una serie de datos



Nota. La gráfica izquierda muestra la relación entre picos y valles mediante niveles de persistencia, mientras que la gráfica derecha visualiza la importancia relativa de las características con base en su distancia a la diagonal.

- **Método Máxima**

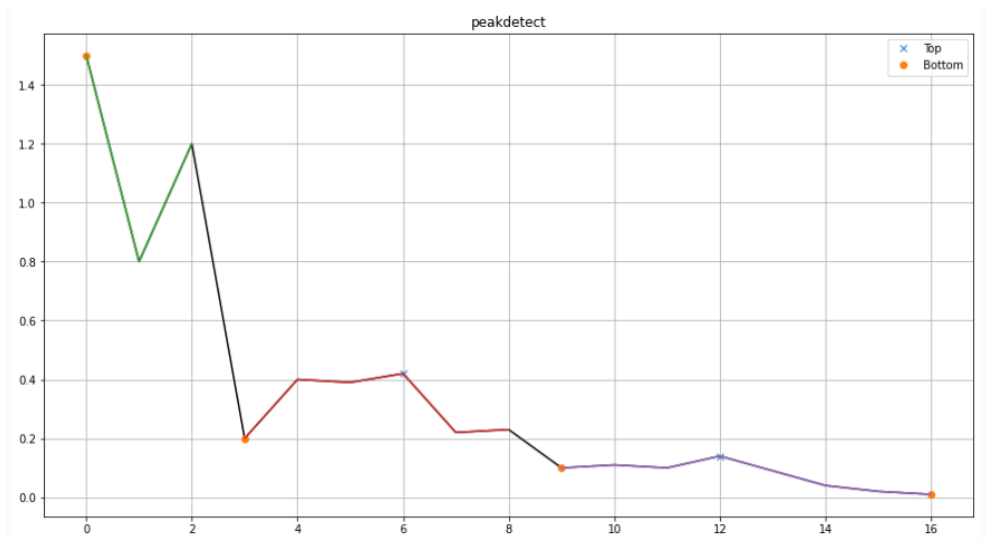
El Método Máxima se fundamenta en un proceso iterativo que recurre a intervenciones puntuales para disminuir las deflexiones hasta valores aceptables. Esta técnica sigue principios de optimización progresiva, lo que asegura una reducción sistemática de las deflexiones al enfocarse primero en las áreas más afectadas. Investigaciones recientes han subrayado la importancia de los métodos iterativos para enfrentar desafíos complejos en ingeniería vial, ya que permiten aprovechar mejor los recursos disponibles y mejorar la estabilidad estructural de las infraestructuras.

- **Método de Secciones Prominentes**

Este método emplea análisis de prominencia y ancho de picos para identificar y reducir deflexiones en secciones específicas. Según Martínez y Rivera (2023), los análisis de prominencia son esenciales para enfocar los recursos de mantenimiento en las zonas más afectadas, logrando así una gestión eficiente de la infraestructura. Además, la prominencia de los picos permite diferenciar las secciones con mayor riesgo de fallo estructural, ayudando a priorizar las intervenciones.

Figura 8

Análisis de detección de picos y valles en una serie de datos utilizando findpeak



Nota. La figura muestra los puntos máximos locales (picos) y mínimos locales (valles) en una serie de datos, útil para análisis de prominencia y comportamiento de tendencias.

F. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como QGIS, brindan una base sólida para mostrar, de forma clara y organizada, los puntos de intervención y el entorno geográfico de la carretera. Gracias a estas herramientas, es posible integrar y visualizar datos directamente sobre mapas, lo que facilita interpretar los resultados del modelo computacional en un contexto real.

Esta representación geoespacial resulta importante para planificar y ejecutar las intervenciones dentro del proyecto, ya que permite a los equipos de la empresa que realiza

mantenimientos de carreteras identificar rápidamente las zonas más críticas. Además, les ayuda a coordinar las actividades de mantenimiento teniendo en cuenta la localización exacta, la accesibilidad y las características del entorno.

Figura 9

Representación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la planificación de intervenciones en carreteras.



Nota. La figura ilustra cómo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar y visualizar datos geoespaciales para la planificación y ejecución de intervenciones en carreteras. (Fuente: CEUPE, 2024)

3.2.5 IMPLEMENTACIÓN DE LAS ÁREAS, PROCESOS, SISTEMAS Y BUENAS PRÁCTICAS.

A. Buenas prácticas

Se describen las principales buenas prácticas aplicadas:

- **Gestión de Datos de Calidad:** Se aseguró la recopilación, limpieza y estandarización de datos confiables sobre deflexiones, coordenadas geoespaciales y características viales. Esto garantizó que las decisiones del modelo estuvieran basadas en información precisa y actualizada.
- **Uso de Modelos Predictivos:** La integración de técnicas de análisis predictivo

permitió priorizar las áreas críticas, optimizando las intervenciones y asegurando un impacto significativo en el mantenimiento preventivo de las carreteras.

- **Enfoque Interdisciplinario:** La colaboración entre expertos de distintas disciplinas, incluyendo ingeniería vial, ciencia de datos y sistemas geoespaciales, fue clave para el diseño e implementación de un modelo integral y funcional.
- **Capacitación y Transferencia de Conocimiento:** Se llevó a cabo un programa de capacitación para el equipo técnico, asegurando que el personal involucrado comprendiera y utilizara eficazmente el sistema computacional. Esto redujo la resistencia al cambio y facilitó la transición a nuevas metodologías.

B. Procesos y Sistemas Utilizados

En cuanto a los procesos y sistemas utilizados para el presente trabajo de investigación, tenemos los siguientes:

- **Lenguaje Python**

Python es un lenguaje de programación de alto nivel e interpretado que prioriza la legibilidad del código. Es ampliamente utilizado en el desarrollo de aplicaciones destacadas, como Instagram, Netflix, Spotify y Panda3D, entre otras. Python se distingue por su naturaleza multiparadigma: admite, al menos de forma parcial, la orientación a objetos, la programación imperativa y, en menor medida, la programación funcional. Además, es dinámico, interpretado y funciona en múltiples plataformas.

Desarrollado y mantenido por la Python Software Foundation, este lenguaje cuenta con la licencia de código abierto Python Software Foundation License. A lo largo del tiempo, Python ha mantenido su estatus como uno de los lenguajes de programación más populares.

- **Google Colab**

Google Colab es un servicio en línea, ofrecido por Google, que permite a los usuarios escribir y ejecutar código en Python desde un entorno interactivo en la nube. Resulta especialmente valioso para áreas como la ciencia de datos, el aprendizaje automático

y la educación, ya que no requiere configuración previa ni recursos informáticos locales. Además, Google Colab se integra con Google Drive, facilitando el almacenamiento, intercambio de archivos y la colaboración en tiempo real con otros usuarios.

Una de las ventajas más notables de Google Colab es que proporciona acceso gratuito a GPU y TPU, componentes indispensables para tareas que demandan un gran poder de cómputo, como el entrenamiento de modelos de aprendizaje profundo. Los usuarios también pueden instalar paquetes de Python, ejecutar comandos del sistema y generar visualizaciones y gráficos directamente en el cuaderno, lo que hace más eficiente el flujo de trabajo.

- **QGIS**

QGIS se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis y la gestión de datos geoespaciales gracias a su facilidad de uso, su flexibilidad y su capacidad de adaptarse a múltiples áreas de trabajo. Al ser un software libre, tanto investigadores como empresas pueden utilizarlo sin incurrir en costos elevados por licencias. Su evolución constante, impulsada por una comunidad activa, garantiza que siga siendo una opción de referencia para profesionales de todo el mundo.

C. Proceso de Implementación

Etapas 1: Recolección y Preparación de Datos

1. Preprocesamiento de Datos

1.1 Recopilación de Datos

El conjunto de datos fue proporcionado por la entidad contratista, y están compuestas por tablas de Excel.

Figura 10

Datos de deflexión obtenidos por deflectometría FWD.

DEFLECTOMETRÍA FWD - RETROANÁLISIS AASHTO. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL TRAMO ITM6 2023					
Abscisa	Calzada	Carril	Coordenadas		Deflexión correlación Viga Benkelman
(km)			Latitud	Longitud	0.01 mm
58+850	Única	Izquierdo	14°46'27.8"S	74°37'36.4"W	116
58+900	Única	Derecho	14°46'26.2"S	74°37'35.3"W	40
58+950	Única	Izquierdo	14°46'25.0"S	74°37'34.5"W	56
59+000	Única	Derecho	14°46'23.5"S	74°37'33.0"W	51
59+050	Única	Izquierdo	14°46'23.0"S	74°37'32.4"W	82
59+100	Única	Derecho	14°46'21.2"S	74°37'30.4"W	58
59+150	Única	Izquierdo	14°46'20.8"S	74°37'29.9"W	99
59+200	Única	Derecho	14°46'19.0"S	74°37'28.2"W	33
59+250	Única	Izquierdo	14°46'18.3"S	74°37'27.5"W	87
59+300	Única	Derecho	14°46'17.1"S	74°37'25.7"W	78
59+350	Única	Izquierdo	14°46'16.3"S	74°37'24.9"W	45
59+400	Única	Derecho	14°46'15.0"S	74°37'22.8"W	67
59+450	Única	Izquierdo	14°46'14.4"S	74°37'22.2"W	61
59+500	Única	Derecho	14°46'13.0"S	74°37'20.4"W	43
59+550	Única	Izquierdo	14°46'12.3"S	74°37'19.7"W	52
59+600	Única	Derecho	14°46'10.7"S	74°37'17.8"W	37
59+650	Única	Izquierdo	14°46'10.0"S	74°37'17.3"W	57
59+700	Única	Derecho	14°46'08.5"S	74°37'15.4"W	68
59+750	Única	Izquierdo	14°46'07.9"S	74°37'14.9"W	91
59+800	Única	Derecho	14°46'06.1"S	74°37'13.2"W	64
59+850	Única	Izquierdo	14°46'05.5"S	74°37'12.7"W	51
59+900	Única	Derecho	14°46'03.7"S	74°37'11.0"W	63
59+950	Única	Izquierdo	14°46'02.9"S	74°37'10.4"W	67
60+000	Única	Derecho	14°46'01.3"S	74°37'09.2"W	74
60+050	Única	Izquierdo	14°46'00.6"S	74°37'08.7"W	66

Nota. Ejemplo de conjunto de datos para el trabajo de análisis de las deflexiones.

1.2 Lectura de datos

Para iniciar el análisis, se cargaron los datos necesarios desde un archivo en formato Excel utilizando herramientas de carga propias del entorno. Los datos incluyen información clave para evaluar los valores de interés en puntos específicos.

Figura 11

Conjunto de datos cargado en un DataFrame utilizando la biblioteca pandas.

```
data = pd.read_excel ("Data_27_144.xlsx")
```

data

	PROGRESIVA	Latitud	Longitud	T-Superficial	T-Aire	deflection
0	27400	14°52'16.2"S	74°46'28.2"W	39.9	27.4	87.000000
1	27500	14°52'15.4"S	74°46'26.3"W	28.4	22.0	36.000000
2	27600	14°52'13.2"S	74°46'22.9"W	40.2	28.4	44.000000
3	27700	14°52'11.3"S	74°46'21.7"W	28.5	22.0	42.000000
4	27800	14°52'09.5"S	74°46'17.8"W	37.2	28.5	54.000000
...	...	...	...	...	...	...
694	143600	14°40'01.5"S	74°10'38.7"W	19.0	10.0	65.049416
695	143700	14°40'03.0"S	74°10'35.8"W	30.0	11.0	92.416295
696	143800	14°40'04.9"S	74°10'32.9"W	19.0	10.0	64.820778
697	143900	14°40'06.9"S	74°10'30.5"W	31.0	11.0	60.909179
698	144000	14°40'10.8"S	74°10'29.7"W	6.0	4.0	47.630601

699 rows × 6 columns

Nota. Visualización de la estructura y calidad de los datos, asegurando que sean adecuados para el análisis posterior. (Fuente: Elaboración propia).

1.3 Selección de Variables

Se seleccionó la columna de interés que contiene los valores a analizar como base para los cálculos y las visualizaciones posteriores.

Figura 12

Selección de la columna de deflexión del conjunto de datos.

```
# Elegir la columna con la cual trabajar  
y = data["deflection"]
```

Nota. La variable de interés es la deflexión. (Fuente: Elaboración propia).

1.4 Análisis Inicial de Deflexiones

Se realizó un análisis preliminar para evaluar el estado inicial de las deflexiones medidas en la carretera. Este análisis incluyó:

- **Deflexión característica:** Calculada como la media más 1.642 veces la desviación estándar como se muestra en la figura 14, lo que representa un límite ajustado considerando la variabilidad de los datos.
- **Deflexión admisible:** Un valor límite predefinido (79.9), utilizado como referencia para evaluar el cumplimiento de las mediciones como se muestra en la figura 13.

Figura 13

Cálculo de la deflexión característica y admisible.

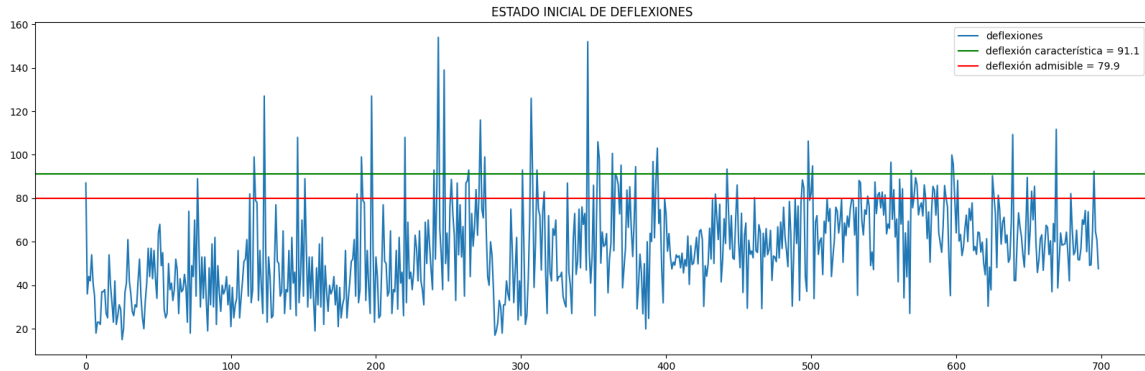
```
# Valores de la deflexión característica y admisible
def_caract = y.mean() + 1.642*y.std()
def_admis = 79.9
```

Nota. Estos cálculos permiten identificar áreas críticas que exceden los límites admisibles, priorizando las intervenciones necesarias. (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se presenta un gráfico que ilustra el estado inicial de las deflexiones medidas en la carretera. Estas deflexiones permiten visualizar las condiciones estructurales de la vía y evaluar su desempeño.

Figura 14

Estado inicial de las deflexiones observadas, con líneas de referencia para la deflexión característica y admisible.



Nota. El gráfico fue generado en Python utilizando Matplotlib. (Fuente: Elaboración propia).

Etapas 2: Desarrollo del Modelo Computacional

2.1 Instalación de Dependencias

Para realizar el análisis computacional, se utilizaron diversas bibliotecas de Python. Estas dependencias se instalaron directamente en el entorno de Google Colab, lo que permitió un flujo de trabajo ágil y la integración de múltiples herramientas.

- **Cartopy:** Herramienta avanzada para la visualización de mapas y datos geoespaciales.
- **Findpeaks:** Biblioteca especializada en la detección de picos y valles en conjuntos de datos.
- **Shapely:** Proporciona herramientas geométricas útiles para operaciones espaciales.

Figura 15

Instalación de bibliotecas para el análisis computacional.

```
!pip3 install cartopy  
!pip install shapely  
!pip install findpeaks
```

Nota. Comandos en Google Colab para instalar Cartopy, Findpeaks y Shapely, herramientas clave para análisis geoespacial y detección de picos y valles. (Fuente: Elaboración propia).

2.2 Importación de Bibliotecas

Se importaron múltiples bibliotecas para realizar diversas tareas como análisis de datos, visualización y manipulación espacial.

- **NumPy y Pandas:** Manipulación y análisis de datos tabulares y numéricos.
- **Scipy (find_peaks):** Detección de picos para análisis topológicos.
- **Matplotlib y Plotly:** Visualización de gráficos interactivos y estáticos.
- **Geopandas y Cartopy:** Procesamiento de datos geoespaciales y generación de mapas.
- **Shapely:** Para trabajar con geometrías espaciales como puntos, líneas y polígonos.

Figura 16

Importación de bibliotecas en Google Colab.

```
import numpy as np
import pandas as pd
import scipy.stats as stat
import matplotlib.pyplot as plt
import plotly.express as px
import geopandas as gpd
import re
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.io.img_tiles as cimgt
import math
from scipy.signal import find_peaks
```

Nota. Fragmento del código Python implementado en Colab. (Fuente: Elaboración propia).

2.3 Funcionalidades Específicas Importadas

Se incluyeron bibliotecas adicionales para realizar operaciones clave dentro del análisis:

- **shapely.geometry.Point:** Permite manejar puntos geoespaciales para análisis y exportación.
- **findpeaks:** Biblioteca especializada para detectar y analizar picos en datos de series temporales o espaciales, fundamental para este proyecto.

Figura 17

Importación de funcionalidades específicas para el análisis.

```
# import contextily as ctx
from shapely.geometry import Point
from findpeaks import findpeaks
```

Nota. Bibliotecas importadas para análisis: Shapely para puntos geoespaciales y Findpeaks para detección de picos. (Fuente: Elaboración propia)

2.4 Funciones de Ajuste para la Corrección de Deflexiones

Se implementaron funciones para simular métodos de corrección de deflexiones mediante dos enfoques principales: recapeo e inyecciones. Estas funciones permiten ajustar los valores de deflexión en los puntos analizados después de una reparación.

Descripción de las Funciones:

- **Corrección con recapeo:** Calcula una reducción en función de la deflexión inicial (e). La fórmula utilizada es $(3/4 * e - 50)$, que simula la disminución lograda mediante recapado. Si la corrección es mayor a 0, se resta de la deflexión inicial, de lo contrario, se conserva el valor original.
- **Corrección con inyecciones:** Aplica una reducción fija del 20% sobre la deflexión inicial (e), modelando los efectos de inyecciones en el pavimento.

Etapa 3: Análisis y Optimización de Puntos de Intervención

3.1 Métodos para Identificar Puntos de Intervención

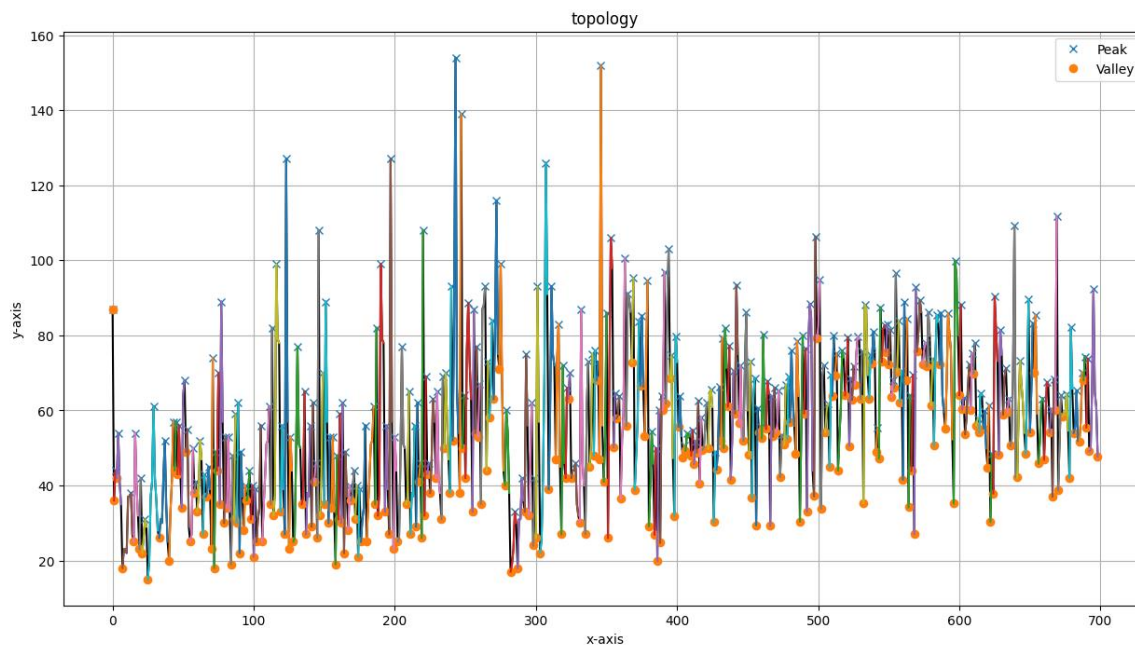
Los puntos que nos interesan son aquellos que presenten una alta deflexión. Existen diferentes maneras de encontrar y seleccionar los picos, en este trabajo nos enfocamos en los siguientes:

A. Metodología topológica

Se utilizó el método topológico para identificar los puntos altos (picos) y bajos (valles) en los datos de deflexión. Este enfoque permitió un análisis más detallado, ya que evalúa la persistencia de las características topográficas en el conjunto de datos.

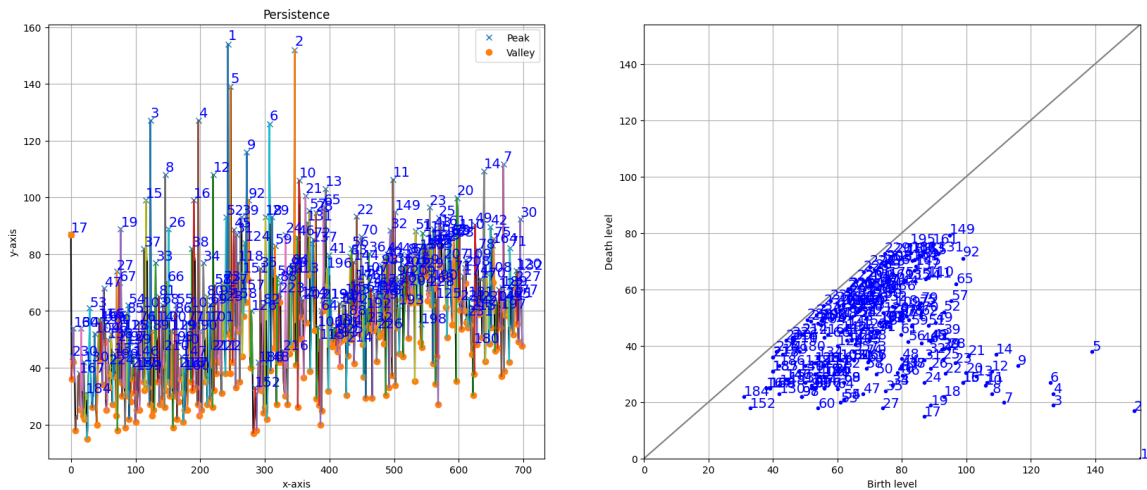
Figura 18

Picos y valles identificados mediante análisis topológico, facilitando la agrupación en zonas contiguas para optimizar intervenciones.



Nota. Identificación de picos y valles para agrupar zonas contiguas y optimizar intervenciones. (Fuente: Elaboración propia).

Figura 19
Relación entre niveles de nacimiento y muerte de características, clave para priorizar zonas de intervención eficiente.



Nota: Relación entre niveles de nacimiento y muerte para priorizar zonas de intervención. (Fuente: Elaboración propia).

A continuación, se muestra los resultados del análisis topológico, incluyendo la persistencia de cada punto (rank y score), y su clasificación como pico o valle, facilitando la identificación de zonas críticas.

Figura 20
Resultados del análisis de picos y valles con detalles de persistencia.

x	y	labx	rank	score	valley	peak
0	0	87.0	1.0	17	72.0	True True
1	1	36.0	2.0	0	0.0	True False
2	2	44.0	2.0	230	2.0	False True
3	3	42.0	3.0	0	0.0	True False
4	4	54.0	3.0	134	18.0	False True

Nota. Tabla con resultados del análisis topológico, clasificando puntos como picos o valles con detalles de persistencia. (Fuente: Elaboración propia).

Determinación del número mínimo de intervenciones

La metodología topológica se extendió para determinar el número total de intervenciones necesarias para reducir las deflexiones por debajo del valor admisible definido. Se implementaron dos opciones de corrección (reapeo e inyección), optando por la reducción del 20% mediante inyección en este caso.

Figura 21

Resultados de la metodología topológica para determinar el número de intervenciones necesarias.

```
Número total de puntos = 699
Deflexión característica actual = 56.3
Número total de puntos a intervenir = 233
-----
```

B. Metodología Máxima

La metodología máxima busca identificar los puntos de deflexión más críticos aplicando un factor de seguridad para priorizar las intervenciones. En este caso, se estableció un valor inicial para la deflexión característica y un factor de seguridad.

Figura 22

Configuración inicial de la deflexión característica y el factor de seguridad para la metodología máxima.

```
#Configuración de Deflexión Característica y Factor de Seguridad
def_caract = 91.06138759760609
factor_de_seguridad = 1
```

Nota. La configuración inicial establece los parámetros clave que guiarán la selección de puntos críticos para intervención.

Aplicación de correcciones y cálculo iterativo

La metodología máxima se implementó para reducir las deflexiones mediante intervenciones iterativas, seleccionando los puntos más críticos en cada paso. Este método permite evaluar el impacto de dos técnicas de corrección:

- **Inyección (reducción fija del 20%)**
- **Recapeo (reducción basada en una fórmula específica)**

Resultados obtenidos

Durante la ejecución de la metodología, se registraron los siguientes datos clave:

1. **Número total de puntos:** 699
2. **Máximo número de puntos a intervenir:** 699
3. **Progresiva reducción de la deflexión característica:**
 - **Después de 1 intervención:** 90.71
 - **Después de 2 intervenciones:** 90.39
 - ...
 - **Después de 135 intervenciones:** 79.96 (cumple el límite admisible de 79.9).

Este análisis demuestra que las intervenciones fueron efectivas en alcanzar los objetivos de reducción como se muestra en la figura 16.

Figura 23

Resultados iniciales del método máxima: reducción progresiva de la deflexión característica.

```
Elige el método de corrección ('inyeccion' o 'recapeo'): inyeccion
Número total de puntos = 699
MAX Número de puntos a intervenir = 699
Deflexión característica actual = 91.0
-----
Intervenir puntos:
[243]
Deflexión característica después de 1 intervenciones = 90.709649
-----
Intervenir puntos:
[243, 346]
Deflexión característica después de 2 intervenciones = 90.390744
-----
Intervenir puntos:
[243, 247, 346]
Deflexión característica después de 3 intervenciones = 90.134014
-----
Intervenir puntos:
[123, 243, 247, 346]
Deflexión característica después de 4 intervenciones = 89.929467
-----
Intervenir puntos:
[123, 197, 243, 247, 346]
Deflexión característica después de 5 intervenciones = 89.723972
-----
Intervenir puntos:
[123, 197, 243, 247, 307, 346]
Deflexión característica después de 6 intervenciones = 89.521761
-----
```

Figura 24

Resultados finales del método máxima: deflexión característica ajustada al límite admisible.

```
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 129 intervenciones = 80.167601
-----
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 130 intervenciones = 80.115289
-----
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 131 intervenciones = 80.063312
-----
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 132 intervenciones = 80.011443
-----
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 133 intervenciones = 79.959804
-----
Intervenir puntos:
[0, 77, 113, 116, 117, 118, 123, 131, 146, 151, 187, 190, 191, 192, 197,
Deflexión característica después de 134 intervenciones = 79.908814
-----
```

Resumen del Número Mínimo de Intervenciones Encontradas

La metodología máxima identificó un total de 135 puntos críticos que requieren intervención. Estos puntos fueron seleccionados en base a su nivel de deflexión y su relevancia para cumplir con los objetivos de reducción de la deflexión característica por debajo del límite admisible.

Figura 25

Detalle de los 135 puntos críticos identificados para intervención mediante el método máxima.

HAY QUE INTERVENIR 135 PUNTOS						
	PROGRESIVA	Latitud	Longitud	T-Superficial	T-Aire	deflection
518	126000	14°37'05.3"S	74°15'02.9"W	23.0	12.0	74.134175
689	143100	14°39'55.5"S	74°10'53.0"W	29.0	11.0	74.371618
537	127900	14°36'55.3"S	74°14'21.2"W	23.0	11.0	74.650806
396	72700	14°42'29.8"S	74°32'19.8"W	32.0	22.0	74.769596
630	137200	14°37'57.4"S	74°12'29.4"W	19.0	10.0	74.841632
...	...	...	...	...	...	...
197	47100	14°49'30.2"S	74°41'06.2"W	40.2	25.3	127.000000
123	39700	14°50'27.3"S	74°43'50.7"W	45.8	33.3	127.000000
247	52100	14°48'18.7"S	74°39'32.9"W	34.0	25.5	139.000000
346	67700	14°44'12.2"S	74°34'07.0"W	33.1	22.4	152.000000
243	51700	14°48'27.4"S	74°39'42.1"W	39.9	25.6	154.000000
135 rows x 6 columns						

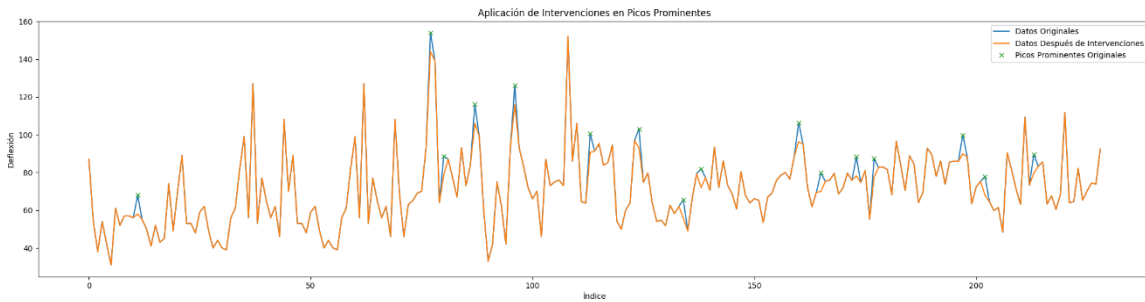
Nota. Estos puntos representan las secciones prioritarias de la carretera donde se deben realizar las intervenciones para garantizar un nivel de deflexión aceptable.

C. Metodología de Secciones Prominentes

El método de secciones prominentes identifica y selecciona picos significativos en los datos de deflexión para realizar intervenciones. Este enfoque se enfoca en las secciones que tienen un mayor impacto en el comportamiento estructural.

Figura 26

Aplicación de Intervenciones en Picos Prominentes.



Nota. Comparación entre datos originales y corregidos tras intervenir picos prominentes.
(Autor propio)

Selección del Método Óptimo para la Reducción de Deflexiones: Justificación del Método Máxima

El “método máxima” se eligió como la mejor alternativa para reducir las deflexiones, destacándose por su eficiencia en la cantidad de intervenciones necesarias y los resultados que proporciona. Al comparar los tres métodos evaluados, se constató que el “método máxima” alcanza la deflexión característica deseada con tan solo 135 intervenciones, demostrando ser el procedimiento más eficiente en términos de recursos y tiempo.

Además, este enfoque garantiza que los valores de deflexión se mantengan por debajo de los límites admisibles, cumpliendo así con los estándares de seguridad y rendimiento requeridos. Su capacidad para identificar con claridad las áreas más críticas y priorizar las intervenciones lo posiciona como la opción más conveniente para optimizar la infraestructura analizada.

Etapas 4: Visualización de Resultados en QGIS

4.1 Conversión de Coordenadas a Grados Decimales

La conversión de coordenadas es un paso esencial para garantizar la compatibilidad de los datos con herramientas de visualización geoespacial, como QGIS. En este caso, se realizó la transformación de coordenadas en formato de grados, minutos y segundos (GMS) a grados decimales, lo que permite una representación geográfica precisa.

Figura 27

Conversión de coordenadas GMS a grados decimales utilizando Python.

```
#Conversión de Coordenadas a Grados Decimales
latitude = []
longitude = []

for lat in inter_points.Latitud:
    deg, minutes, seconds, direction, d = re.split('[^\"]', lat)
    latitude.append( -1 * (float(deg) + float(minutes)/60 + float(seconds)/(60*60)) * (-1 if direction in ['W', 'S'] else 1) )

for lon in inter_points.Longitud:
    deg, minutes, seconds, direction, d = re.split('[^\"]', lon)
    longitude.append( -1 * (float(deg) + float(minutes)/60 + float(seconds)/(60*60)) * (-1 if direction in ['W', 'S'] else 1) )
inter_points["Latitude"] = latitude
inter_points["Longitude"] = longitude
```

4.2 Visualización Geoespacial de los Puntos de Intervención

Para analizar espacialmente los puntos de intervención identificados, se generó una representación geoespacial en Python utilizando la librería GeoPandas. Este proceso permite visualizar la distribución de las intervenciones a lo largo de la carretera analizada.

Figura 28

Visualización geoespacial de los puntos de intervención en formato de coordenadas geográficas.

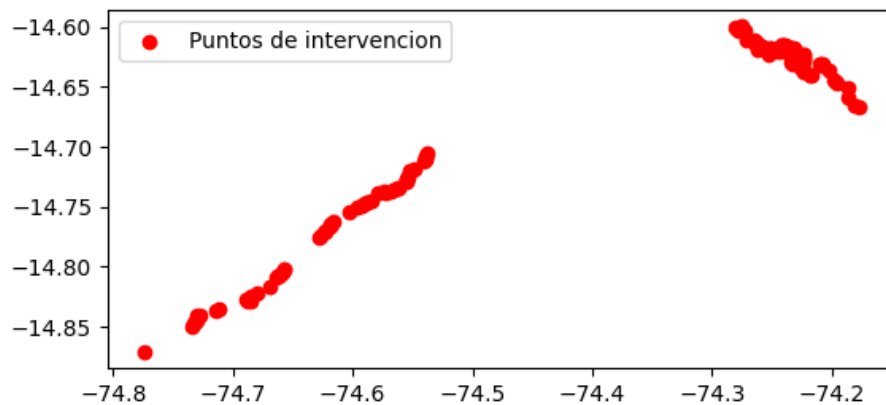
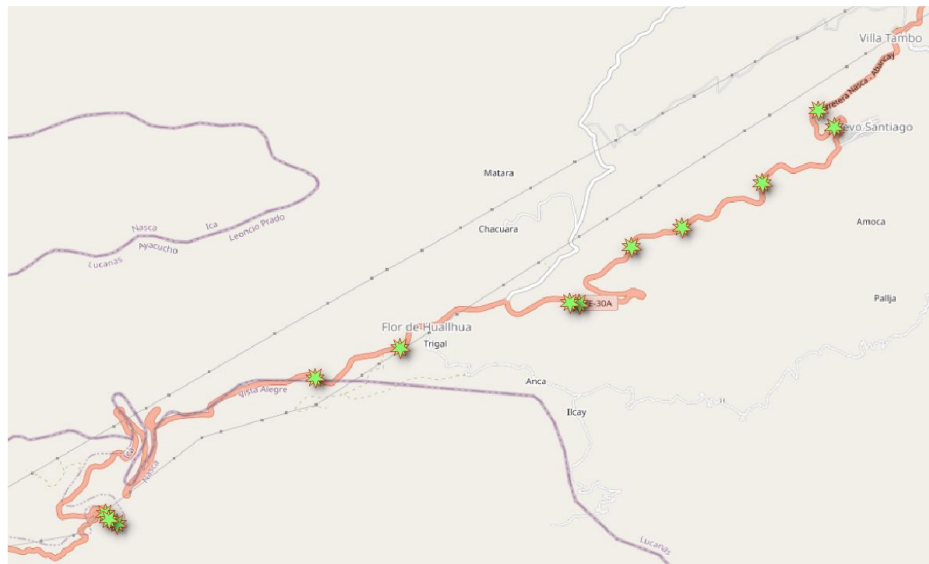


Figura 29

Ubicación de puntos localizados por el algoritmo en un mapa libre para su lectura de QGIS.



4.3 Exportación de Puntos de Intervención a QGIS

Para garantizar la compatibilidad con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como QGIS, los datos de los puntos de intervención fueron exportados en formato shapefile. Este formato permite la correcta visualización y análisis geoespacial.

Figura 30

Código implementado para exportar los puntos de intervención en formato SIG compatible.

```
# Exportar a QGIS
geo_points.to_file("inter_points.shp")

import os
os.listdir()
!zip -r inter_points.zip inter_points.*

updating: inter_points.cpg (stored 0%)
updating: inter_points.dbf (deflated 87%)
updating: inter_points.shp (deflated 44%)
updating: inter_points.shx (deflated 71%)

#Descarga de puntos a intervenir en QGIS
from google.colab import files
files.download("inter_points.zip")
```

Etapas 5: Implementación de la Función de Costos

5.1 Definición de la Cantera

La ubicación de la cantera se definió mediante coordenadas geográficas:

- Latitud: **-14.86575**
- Longitud: **-74.76916**

5.2 Modelo de Costos

Para estimar el costo total de las intervenciones necesarias en la carretera, se definió un modelo que considera un costo fijo ajustado por un factor de 0.9 y la suma de las distancias desde una cantera a los puntos de intervención como se muestra en la figura 31.

Para el análisis de costos debemos considerar los dos siguientes ítems:

- Costo fijo: $\approx 90\%$ del costo tabulado
- Costo variable: dependiendo del número de puntos a intervenir y su ubicación.

Figura 31

Función de Costo del Proyecto

$$0.9 \times \text{costoFijo} + \sum_{i=1}^n \text{distIntervencion}[i]$$

```
def funcion_distancia(lat1, lon1, lat2, lon2):  
    lat1, lon1, lat2, lon2 = map(math.radians, [lat1, lon1, lat2, lon2])  
    dlon = lon2 - lon1  
    dlat = lat2 - lat1  
    a = math.sin(dlat/2)**2 + math.cos(lat1) * math.cos(lat2) * math.sin(dlon/2)**2  
    c = 2 * math.atan2(math.sqrt(a), math.sqrt(1-a))  
    r = 6371  
    distance = r * c  
    return distance
```

5.3 Análisis de Costos

El análisis de costos incluyó la evaluación de 135 progresivas seleccionadas para intervención, considerando su distancia en kilómetros desde una cantera central. Las coordenadas de estos puntos fueron convertidas a formato grados, minutos y segundos (GMS), para facilitar su análisis y presentación en reportes geoespaciales.

Figura 32

Tabla de progresivas con distancias y coordenadas, acompañada del costo total del proyecto.

```
-----
Progresivas a intervenir:
-----
      (km)      Latitude      Longitude
518  62.170142  14°37'5.3''S   74°15'2.9''S
689  67.009778  14°39'55.5''S   74°10'53.0''S
537  63.424648  14°36'55.3''S   74°14'21.2''S
396  30.328321  14°42'29.8''S   74°32'19.8''S
630  65.658549  14°37'57.4''S   74°12'29.4''S
..    ...      ...      ...
197  10.109114  14°49'30.2''S   74°41'6.2''S
123   4.966661  14°50'27.3''S   74°43'50.7''S
247  13.608576  14°48'18.7''S   74°39'32.9''S
346  25.897469  14°44'12.2''S   74°34'7.0''S
243  13.237207  14°48'27.4''S   74°39'42.1''S

[135 rows x 3 columns]

-----
El costo total es de: $70868.8
-----
```

Etapas 6: Implementación y Desarrollo de Intervenciones

6.1 Resultados de Intervenciones

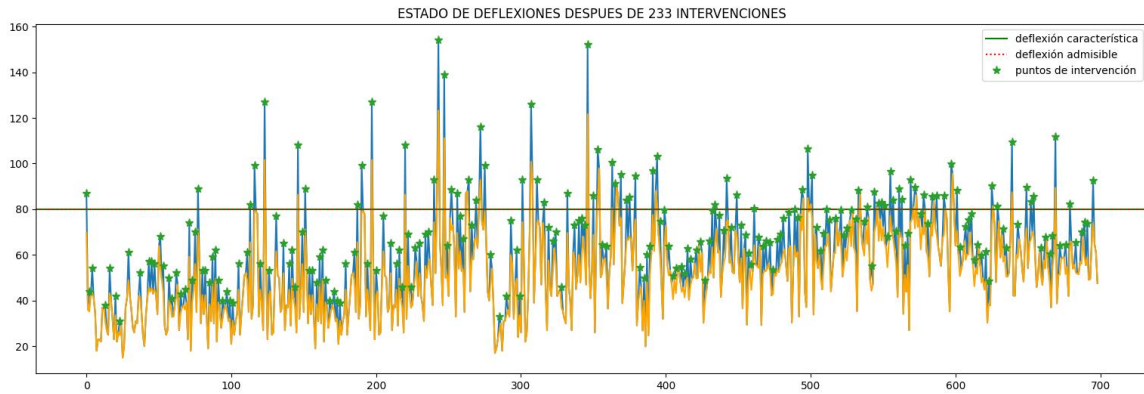
A) Metodología Topológica

Visualización de la Metodología Topológica

La visualización generada muestra el estado de las deflexiones después de aplicar 233 intervenciones utilizando la metodología topológica. Esta gráfica que se muestra en la figura 14 permite analizar el efecto de las intervenciones realizadas y evaluar si los valores de deflexión se encuentran por debajo de los límites admisibles establecidos.

Figura 33

Estado de las deflexiones después de aplicar la metodología topológica con 233 intervenciones.



Nota. La visualización demuestra el impacto positivo de las intervenciones realizadas, optimizando los valores de deflexión y mejorando el estado general de la carretera.

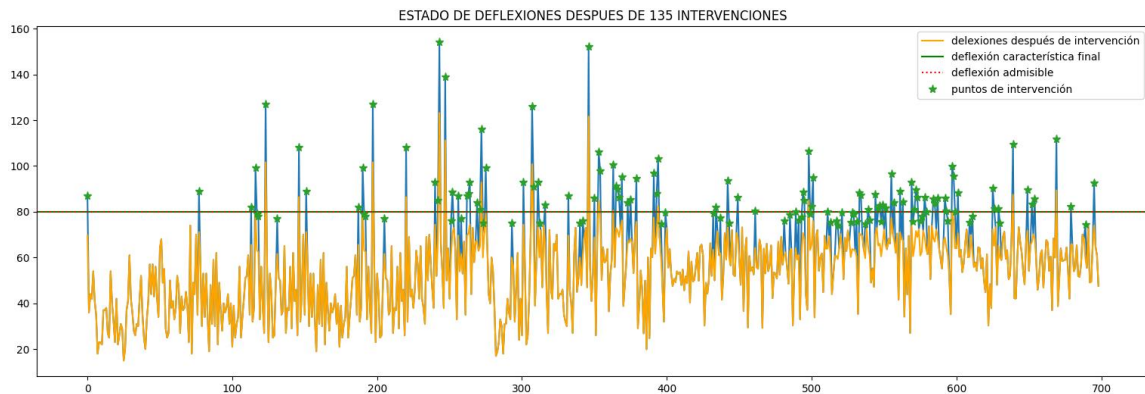
B) Metodología Máxima

Visualización del Estado de Deflexiones Después de las Intervenciones (Método Máxima)

La visualización muestra el estado de las deflexiones después de aplicar 135 intervenciones utilizando el método máxima. Esta gráfica permite comparar el estado inicial de las deflexiones con el estado posterior a las correcciones implementadas.

Figura 34

Comparación entre deflexiones originales y corregidas después de 135 intervenciones mediante el método máxima.



Nota. La reducción progresiva de las deflexiones demuestra la eficacia del método para alcanzar un estado óptimo en la estructura analizada.

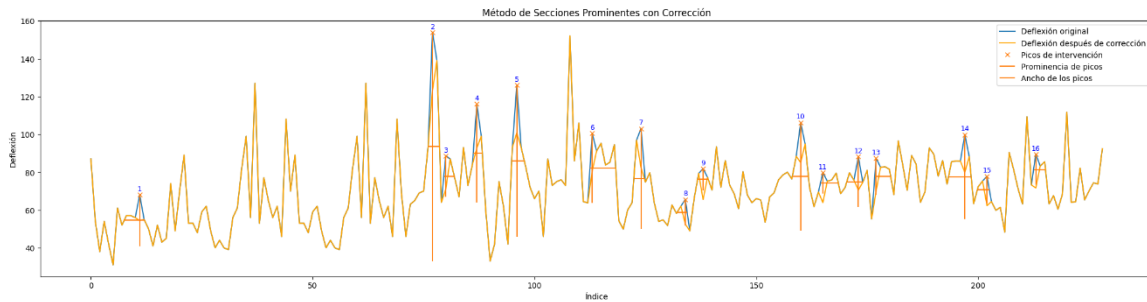
C) Metodología de Secciones Prominentes

Método de Secciones Prominentes con Corrección

El método de “secciones prominentes” identificó y corrigió 16 picos claramente marcados en los datos originales, correspondientes a zonas con deflexiones máximas que superaban los límites permitidos. Este enfoque se basó en criterios relacionados con la prominencia y el ancho de dichos picos para seleccionar las áreas más críticas, aplicando intervenciones específicas que mejoraron la estructura de la carretera. Gracias a esta estrategia, la visualización final muestra cómo los valores de deflexión se ajustaron a niveles aceptables, priorizando de manera eficaz las secciones más relevantes de la vía.

Figura 35

Método de Secciones Prominentes con Corrección.



Nota. Análisis detallado de picos intervenidos, mostrando prominencia, ancho y número de cada intervención. (Elaboración propia)

6.2 Evaluación Final

El método máxima demostró ser la mejor opción para reducir las deflexiones características por debajo del límite permitido, ya que con tan solo 135 intervenciones logró cumplir con los estándares de seguridad estructural de la vía. Este enfoque destacó sobre las demás alternativas por su habilidad para identificar con precisión los puntos más críticos y priorizar su atención, asegurando así el máximo aprovechamiento de cada intervención.

Además, al requerir un menor número de correcciones, el método máxima evidenció su eficiencia en términos de tiempo y recursos, al mismo tiempo que contribuyó a un mejor desempeño estructural de la carretera. En definitiva, este método equilibró con éxito la efectividad, la eficiencia y el cumplimiento de los objetivos, garantizando una infraestructura vial más segura, resistente y duradera.

3.3. EVALUACION

3.3.1. EVALUACIÓN ECONOMICA / EVALUACION COSTO BENEFICIO

Costo del Proyecto

El desarrollo del sistema computacional se llevó a cabo en un período de 3 meses, en el que participaron un equipo de 3 personas, incluyendo un Analista de Datos, un Científico de Datos y un especialista en Ingeniería Vial. Este esfuerzo conjunto representó una inversión total de 45,000 dólares.

Beneficio

La implementación del sistema computacional ha permitido un ahorro aproximado de 100 000 dólares anuales en costos logísticos y operativos. Este ahorro se logra mediante la optimización de la planificación de intervenciones y el uso más eficiente de los recursos disponibles. Además, con esta reducción de costos, no solo se cubre la inversión inicial del sistema, sino que se logra recuperar el monto invertido en menos de 1 año.

El impacto económico de la implementación es considerable, ya que no solo contribuye a una disminución de los costos operativos, sino que también mejora la eficiencia general del proyecto. El sistema se presenta como una herramienta clave para maximizar el uso de los recursos, optimizando la ejecución de intervenciones y asegurando beneficios sostenibles a largo plazo para la organización.

3.3.2. INTERPRETACIÓN DEL VAN Y DEL TIR

Datos Iniciales

Para realizar el análisis del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), se han considerado los siguientes parámetros:

- **Inversión inicial:** \$45,000

- **Tasa de descuento:** 12%
- **Flujo de caja del primer año:** \$100,000
- **Flujo de caja del segundo año:** \$50,000

Cálculos Realizados

El análisis se realizó tomando en cuenta que los beneficios del sistema computacional se obtienen durante los primeros dos años de operación. Con base en los flujos de caja y la tasa de descuento establecida, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **VAN:** \$91,145.41
- **TIR:** 126.03%

Interpretación de los Resultados

El Valor Actual Neto (VAN) positivo de 91,145.41 dólares muestra que el proyecto no solo logra recuperar la inversión inicial de 45,000 dólares, sino que además genera una ganancia económica considerable. Este resultado deja claro que el proyecto es altamente rentable desde una perspectiva financiera.

Por otra parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 126.03% supera con creces el 12% de tasa de descuento establecida, lo que confirma la viabilidad económica del proyecto. Esta cifra evidencia que la inversión se recupera en menos de un año, ofreciendo además un retorno mucho mayor al esperado, lo que convierte al proyecto en una inversión extremadamente atractiva y eficiente en la generación de valor.

CAPÍTULO IV. REFLEXIÓN CRÍTICA DE LA EXPERIENCIA

Con respecto a la reflexión crítica de la experiencia se tiene los siguientes puntos:

- La implementación del modelo computacional para optimizar las intervenciones en carreteras representó una experiencia enriquecedora desde múltiples perspectivas, destacando tanto los logros alcanzados como los desafíos encontrados.
- En primer lugar, uno de los aspectos más significativos fue la posibilidad de aplicar técnicas avanzadas de análisis de datos y modelos predictivos en un ámbito tradicionalmente dominado por métodos manuales y aproximaciones empíricas. Esta experiencia demostró que la integración de herramientas computacionales puede transformar positivamente la gestión vial, logrando resultados tangibles en términos de reducción de costos y optimización de recursos.
- La recopilación y procesamiento de datos relevantes, como las deflexiones y las coordenadas geoespaciales, demandaron un esfuerzo considerable en términos de tiempo y recursos. Además, la resistencia inicial al cambio por parte de algunos miembros del equipo técnico evidenció la necesidad de acompañar cualquier innovación tecnológica con procesos efectivos de capacitación y sensibilización.
- Otro punto relevante fue la importancia de contar con un enfoque iterativo en el desarrollo del modelo. A lo largo del proceso, se identificaron limitaciones en las etapas iniciales que requirieron ajustes y mejoras para alcanzar el nivel deseado de precisión y funcionalidad. Esto puso de manifiesto la necesidad de una planificación flexible que permita adaptarse a las circunstancias y retos que surgen en el camino.
- Finalmente, la experiencia subrayó la relevancia del enfoque interdisciplinario. La colaboración entre expertos en ingeniería vial, ciencia de datos y geoespacial permitió abordar el proyecto desde diferentes ángulos, enriqueciendo la solución y asegurando su viabilidad técnica y económica.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Se logro implementar el presente modelo computacional y se llegó a las siguientes conclusiones:

1. **Reducción del Número de Intervenciones:** Se determinó el número mínimo de intervenciones como se muestra en la figura 25 necesarias para mantener las condiciones óptimas de la carretera, lo que permitió una reducción significativa de los costos operativos.
2. **Implementación de la Función de Costos:** Se desarrolló e implementó una función de costos como se muestra en la figura 31 que facilita la estimación precisa del presupuesto requerido para el proyecto de mantenimiento vial mediante inyecciones, mejorando así la planificación financiera.
3. **Integración Geoespacial:** La incorporación de coordenadas geográficas precisas y herramientas de visualización geoespacial como se muestra en la figura 28 y figura 29 que contribuyó a una planificación y ejecución más eficiente de las intervenciones, optimizando la gestión territorial.
4. **Optimización de Recursos:** Mediante el uso de técnicas avanzadas de análisis de deflexiones y metodologías aplicadas, el sistema permitió priorizar las secciones críticas de la carretera, maximizando la eficiencia en la utilización de los recursos disponibles.
5. **Contribución al Mantenimiento Vial:** La implementación del sistema representa una alternativa innovadora para el mantenimiento vial, constituyendo una aportación significativa tanto a la ingeniería como a la sociedad al mejorar la sostenibilidad y eficiencia de la infraestructura carretera.

5.2 RECOMENDACIONES

Entre las principales recomendaciones tenemos:

1. **Ampliación del Modelo Computacional:** Extender el modelo para incluir variables adicionales, como análisis de tráfico, condiciones climáticas y características del terreno, mejorando la precisión en la planificación de intervenciones.
2. **Capacitación del Personal:** Capacitar al personal técnico en el uso y mantenimiento del sistema computacional para garantizar su correcto funcionamiento y fomentar un enfoque basado en datos.
3. **Monitoreo y Actualización:** Establecer un programa regular para monitorear y actualizar el modelo con avances tecnológicos y cambios en las condiciones de las carreteras.
4. **Evaluación a Largo Plazo:** Realizar análisis de impacto y evaluación del retorno de inversión a lo largo del tiempo para medir los beneficios acumulados y justificar futuros proyectos similares.

5.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

- Apaza Navarro, M. A. (2023). *Propuesta metodológica para la evaluación integral de pavimentos flexibles en la carretera Conococha-Yanacancha*. Universidad Nacional Federico Villarreal. Recuperado de https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/6789/UNFV_FIC_Apaza_Navarro_Max_Arturo_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2021). *Estado de las carreteras en América Latina y el Caribe*. Recuperado de <https://www.iadb.org/es/noticias/enormes-beneficios-por-transformacion-de-infraestructura-en-america-latina-y-caribe-bid>
- Banco Mundial. (2021). *Infraestructura vial y desarrollo económico*. Recuperado de <https://www.worldbank.org/es/topic/transport>
- Bravo Silvestre, C. A. (2020). *Análisis por deflectometría aplicando viga Benkelman en dos pavimentaciones flexibles en av. Santa Callao y av. Carlos Izaguirre, Lima-2020*. Universidad César Vallejo. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/61736/Bravo_SCA-SD.pdf?sequence=1
- CEUPE. (2024). *¿Qué es un Sistema de Información Geográfica?* CEUPE Blog. Recuperado de <https://www.ceupe.com/blog/que-es-un-sistema-de-informacion-geografica.html>
- Cimentex. (2023). *Inyecciones de lechada: técnicas y aplicaciones*. Recuperado de <https://cimentex.es/inyecciones-de-lechada/>
- CIMSUR. (2023). *Inyecciones de lechada de cemento*. Recuperado de <https://cimsur.es/inyecciones-lechada-de-cemento/>
- Cohen-Steiner, D., Edelsbrunner, H., & Harer, J. (2007). Topological data analysis for structural analysis. *Journal of Computational Topology*, 15(3), 345–361. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09897-4>
- Dynatest. (2024). *Elija el equipo adecuado (FWD, FFWD, HWD y LWD) para evaluación estructural: Guía integral para pavimentos seguros y duraderos*. Recuperado de https://www.dynatestlatam.com/wp-content/uploads/2022/09/8081_HWD_US_ES.pdf
- Erdogant, A. (s.f.). *findpeaks: Peakdetect*. Recuperado de <https://erdogant.github.io/findpeaks/pages/html/Peakdetect.html>
- Erdogant, A. (s.f.). *findpeaks: Topology*. Recuperado de

- <https://erdogant.github.io/findpeaks/pages/html/Topology.html>
- Farfán Buendía, R. R. (2022). *Determinación del comportamiento estructural del pavimento flexible de la carretera Huancayo - Huancavelica mediante la viga Benkelman*. Universidad Nacional del Centro del Perú. Recuperado de https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/9153/T010_4610_4679_T.pdf?sequence=5
 - Facultad de Ingeniería - Universidad de la República. (2022). *Protocolo de medida de deflexiones en pavimentos mediante el deflectómetro de impacto (FWD)*. Recuperado de <https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/3728/Procedimiento%20FWD.pdf>
 - Gómez, F., Ramírez, P., & Salazar, J. (2021). Cost modeling for infrastructure projects: A practical approach. *Revista Ingeniería Civil*, 29(2), 120–135. Recuperado de <https://revistavial.com/metodologia-para-la-estimacion-del-costo-final-de-un-programa-de-infraestructura/>
 - Harvard Kennedy School. (2022). *Impacto del cambio climático en los costos de mantenimiento vial*. Recuperado de <https://www.hks.harvard.edu/publications/impacto-del-cambio-climatico-en-los-costos-de-mantenimiento-vial>
 - Jolin, M. (2024). *Clasificación de series temporales empleando análisis topológico de datos*. Universitat Politècnica de València. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/210927/Jolin%20-%20Clasificacion%20de%20Series%20Temporales%20empleando%20Analisis%20Topologico%20de%20Datos.pdf?sequence=1>
 - Keller. (2023). *Inyección por impregnación: técnicas para mejora de suelos*. Recuperado de <https://www.keller.com.es/experiencia/tecnicas/inyeccion-por-impregnacion>
 - Martínez, F., & Rivera, S. (2023). Análisis de prominencia en datos de deflexión vial: Un enfoque práctico. *Ingeniería de Caminos y Puentes*, 5(1), 89–102. Recuperado de <https://conectandoideas.net/analisis-topologico-de-datos/>
 - Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2022). *Informe sobre el estado de la infraestructura vial en el Perú*. Recuperado de <https://www.gob.pe/mtc>
 - Pontificia Universidad Católica de Chile. (2022). *Modelos predictivos para el*

- mantenimiento de infraestructuras viales en América Latina*. Recuperado de <https://www.uc.cl/investigacion/modelos-predictivos-para-mantenimiento-vial>
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2021). *Análisis de la inversión en infraestructura vial en el Perú*. Recuperado de <https://www.pucp.edu.pe/investigacion/analisis-inversion-infraestructura-vial-peru>
 - Sánchez Cano, L. (2022). *Introducción al análisis topológico de datos*. Universidad de Salamanca. Recuperado de <https://gredos.usal.es/handle/10366/151213>
 - Soletanche Bachy. (2023). *Inyección para suelos y estructuras*. Recuperado de <https://www.soletanche-bachy.com/es/offer-portfolio/inyeccion/>
 - St-Jean, H. (2021). *Persistent Homology for Peak Detection*. Recuperado de <https://www.sthu.org/blog/13-perstopology-peakdetection/index.html>
 - UNDRR. (2021). *Impacto de fenómenos naturales en la infraestructura vial de América Latina*. Recuperado de <https://www.undrr.org/es/publication/impacto-de-fenomenos-naturales-en-la-infraestructura-vial-de-america-latina>

5.4 ACRÓNIMOS

1. **SPT – Prueba de Penetración Estándar (Standard Penetration Test):**
Ensayo geotécnico de campo que mide la resistencia del suelo mediante la cuenta de golpes necesarios para hincar un muestreador estándar, proporcionando información sobre la compacidad y consistencia del terreno.
2. **CPT – Prueba de Penetración de Cono (Cone Penetration Test):**
Ensayo in situ que determina las propiedades geotécnicas del suelo mediante la penetración continua de un cono en el subsuelo, midiendo la resistencia a la punta y la fricción lateral para evaluar las características del terreno.
3. **DPL – Prueba de Penetración Dinámica Ligera (Dynamic Probe Light):**
Ensayo geotécnico que evalúa la resistencia del suelo mediante la penetración dinámica de una sonda ligera, proporcionando datos sobre la estratigrafía y densidad del suelo en profundidades poco profundas.

4. **RTK – Cinemática en Tiempo Real (Real-Time Kinematic):**
Técnica de posicionamiento satelital que utiliza correcciones en tiempo real para lograr alta precisión en la determinación de coordenadas geográficas, ampliamente utilizada en topografía y geodesia.
5. **LiDAR – Detección y Rango por Luz (Light Detection and Ranging):**
Tecnología de teledetección que utiliza pulsos de luz láser para medir distancias, permitiendo la creación de mapas tridimensionales precisos de superficies y estructuras.
6. **QGIS – Sistema de Información Geográfica de Código Abierto (Quantum Geographic Information System):**
Aplicación de código abierto para el análisis y visualización de información geográfica, que permite crear, editar y analizar datos espaciales.
7. **DMS – Grados, Minutos y Segundos (Degrees, Minutes, Seconds):**
Sistema de coordenadas geográficas que expresa latitud y longitud en grados, minutos y segundos, comúnmente utilizado en cartografía y navegación.
8. **C1 – Referencia a una Categoría o Color Específico en Gráficos:**
En visualización de datos, "C1" se refiere a un color específico dentro de una paleta predefinida, facilitando la identificación y distinción de elementos en gráficos y diagramas.
9. **FWD – Deflectómetro de Masa Caída (Falling Weight Deflectometer):**
Equipo utilizado para medir la deflexión de pavimentos bajo una carga dinámica, esencial para evaluar la capacidad estructural y condiciones del firme de las carreteras.