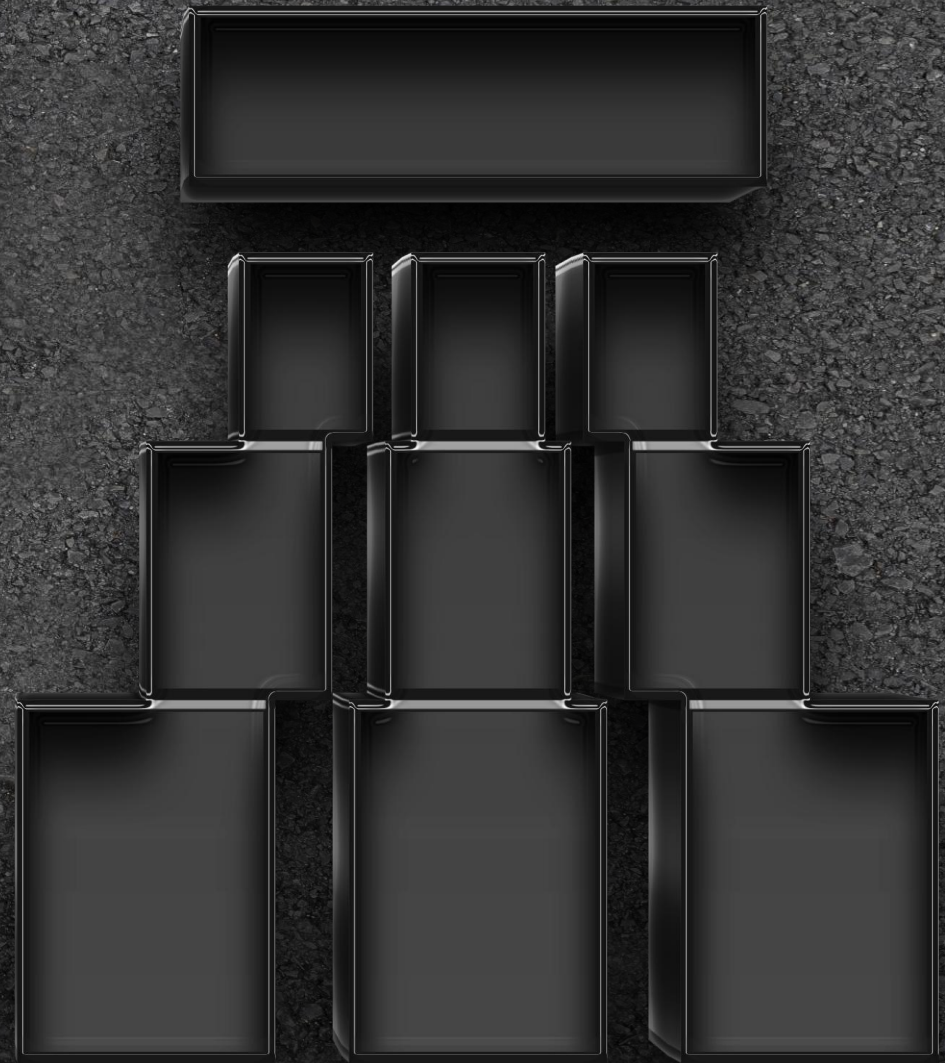




XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México



# Tema: Evaluación y gestión de pavimentos



M. I. Fernando Trejo

xx de agosto 2025

# **AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESPECTROS DE CARGA CON MACHINE LEARNING A TRAVÉS DE UNA API Y SU APLICACIÓN EN UN CASO PRÁCTICO**

**M. I. Fernando Trejo**

Contacto: [contacto@pavanalyzer.com](mailto:contacto@pavanalyzer.com)



PAVANALYZER

XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México

# CONTENIDOS



01

'Machine Learning' como aliado del pavimento

02

Caso Estudio – Estación Zacatal (EECAN)

03

Metodología y aplicación

04

Una herramienta clave para el futuro

05

Conclusiones

# API: La manera inteligente de conectar sistemas

---

Una **API (Application Programming Interface)** conecta programas mediante instrucciones y formatos predefinidos; un programa recibe una solicitud, la procesa y envía una respuesta, permitiendo así que trabajen juntos de forma segura y ordenada.

# Machine Learning: Decisiones que evolucionan

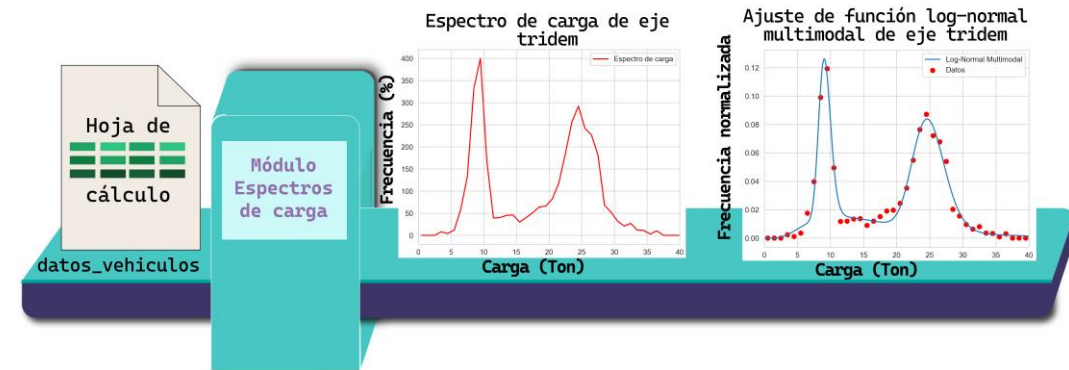
---

El *Machine Learning* (aprendizaje automático) es una rama de la inteligencia artificial que permite a los sistemas **analizar datos, identificar patrones y mejorar sus decisiones de manera autónoma**, sin depender de instrucciones programadas de forma rígida.

# 'Machine Learning' como aliado del pavimento

- **Desarrollada en Python**, con integración de **Machine Learning**.
- **Clasificación vehicular automatizada:** Algoritmo **Random Forest**.
- **Segmentación inteligente de cargas:** Algoritmo **K-Means**.
- **Genera los espectros de cargas** a partir de grandes volúmenes de datos en segundos.

# 'Machine learning' como aliado del pavimento



Genera automáticamente:

- Espectros de carga por tipo de eje.
- Clasificación de cargas **bajas, medias y altas**.
- Estadística descriptiva.
- **Visualizaciones listas para la toma de decisiones.**
- Ajuste log-normal multimodal.
- Identificación de ejes **legales e ilegales**.

# Caso Estudio – Estación Zacatal (EECAN)

---

Aplicación práctica con los datos del año 2011 provenientes de la estación Zacatal, perteneciente al programa EECAN (Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional).

# Caso Estudio – Estación Zacatal (EECAN)

- Datos iniciales: 30,287 filas / 42 columnas (+1.2 M de datos).
- Datos útiles: 7,849 filas / 11 columnas.
- Tiempo de análisis: 70 segundos.

| REGISTRO | DIASEM | SENTIDO | HORA | PLACA  | TIPO | VEHICULO             | POBORI        | MUNORI     | ENTORI    | VEPOBOR    | POBDES     | MUNDES     | ENTDES    | VEPOBDES  | MARCA    | MODEL     | IMBUSTIS | PALE    | VEPUL | MOTIV | VECAR | CARGA          | RGATE | CANTIDAD | AB | AC       |
|----------|--------|---------|------|--------|------|----------------------|---------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|---------|-------|-------|-------|----------------|-------|----------|----|----------|
| 1        | 2      | 1       | 0    | VP66KA | 7    | CAMION DI Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Acayacan   | Acayacan   | Verac      | 30 003 00 | W102      | CAMION I | 1999      | DIESEL   | 0       | 2     |       | 7424  | PAPEL Y PAPEL  | 100   | P        |    | PARES    |
| 2        | 2      | 1       | 0    | SP     | 8    | CAMION DI Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | México     | México     | Distr      | 09 015 00 | W115      | CAMION F | 2004      | DIESEL   | 0       | 2     |       |       |                |       |          |    |          |
| 3        | 2      | 1       | 0    | U      |      | VEHICULO             | Coatzaco      | Coatzaco   | Verac     | 30 039 00  | Oluta      | Oluta      | Verac     | 30 116 00 | U203     | PICK UP R | 1990     | GASOLIN | 0     | 2     |       |                |       |          |    |          |
| 4        | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Coatzaco      | Coatzaco   | Verac     | 30 039 00  | Acayacan   | Acayacan   | Verac     | 30 003 00 | M211     | AUTOMOV   | 2010     | GASOLIN | 2     | 0     | T     | Trabajo        |       |          |    |          |
| 5        | 2      | 1       | 0    | XX396  | 7    | CAMION DI Cosoleaca  | Cosoleaca     | Verac      | 30 048 00 | Acayacan   | Acayacan   | Verac      | 30 003 00 | W110      | CAMION F | 2005      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7465  | ROPA P.ROPA    | 0     | G        |    | GRANEL   |
| 6        | 2      | 1       | 0    | XP9539 | 7    | CAMION DI Coatzaco   | Coatzaco      | Verac      | 30 039 00 | Acayacan   | Acayacan   | Verac      | 30 003 00 | W102      | CAMION I | 2011      | GASOLIN  | 0       | 2     |       | 3019  | OTRAS / POLLO  | 144   | PZ       |    | PIEZAS   |
| 7        | 2      | 1       | 0    | 688DG  | 16   | CAMION DI Palenque   | Palenque      | Chiap      | 07 065 00 | México     | México     | Distr      | 09 015 00 | W112      | CAMION I | 1993      | DIESEL   | 0       | 2     |       |       |                |       |          |    |          |
| 8        | 2      | 1       | 0    | 793AH5 | 11   | TRACTOR E Chinamec   | Chinamec      | Verac      | 30 059 00 | Playa Vice | Playa Vice | Verac      | 30 130 00 | W105      | CAMION I | 1971      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7351  | MAIZ H.MASEAC  | 11    | T        |    | TONELAD. |
| 9        | 2      | 1       | 0    | X058AQ | 12   | TRACTOR E Chinamec   | Chinamec      | Verac      | 30 059 00 | Playa Vice | Playa Vice | Verac      | 30 130 00 | W105      | CAMION I | 1971      | DIESEL   | 0       | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 10       | 2      | 1       | 0    | 428DX  | 18   | TRACTOR E Jáltipan   | Jáltipan      | Verac      | 30 089 00 | Acayacan   | Acayacan   | Verac      | 30 003 00 | W112      | CAMION I | 2008      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7239  | ENVASE ENVASE  | 10000 | PZ       |    | PIEZAS   |
| 11       | 2      | 1       | 0    | 384DX2 | 11   | TRACTOR E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Córdoba    | Córdoba    | Verac      | 30 044 00 | W121      | CAMION F | 1993      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7500  | TUBERI/TUBERI  | 150   | PZ       |    | PIEZAS   |
| 12       | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Jáltipan      | Jáltipan   | Verac     | 30 089 00  | Acayacan   | Acayacan   | Verac     | 30 003 00 | C105     | AUTOMOV   | 2012     | GASOLIN | 1     | 0     | P     | Paseo          |       |          |    |          |
| 13       | 2      | 1       | 0    | XC1211 | 7    | CAMION DI Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Tehuacan   | Tehuacan   | Puebl      | 21 156 00 | W105      | CAMION I | 1983      | DIESEL   | 0       | 3     |       |       |                |       |          |    |          |
| 14       | 2      | 1       | 0    | 626D12 | 11   | TRACTOR E Coatzaco   | Coatzaco      | Verac      | 30 039 00 | Tampico    | Tampico    | Tamau      | 28 038 00 | W110      | CAMION I | 2006      | DIESEL   | 0       | 2     |       |       |                |       |          |    |          |
| 15       | 2      | 1       | 0    | XV1499 | 11   | TRACTOR E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Heroica P  | Puebla     | Puebl      | 21 114 00 | W112      | CAMION I | 1999      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7001  | ABARRCABARRC   | 50    | T        |    | TONELAD. |
| 16       | 2      | 1       | 0    | 714DL3 | 18   | TRACTOR E Minatitlán | Minatitlán    | Verac      | 30 108 00 | Córdoba    | Córdoba    | Verac      | 30 044 00 | W115      | CAMION F | 2008      | DIESEL   | 0       | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 17       | 2      | 1       | 0    | 873DD4 | 18   | TRACTOR E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Heroica P  | Puebla     | Puebl      | 21 114 00 | W121      | CAMION F | 1996      | DIESEL   | 0       | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 18       | 2      | 1       | 0    | 897AL7 | 18   | TRACTOR E Tuxtla Gut | Tuxtla Gut    | Chiap      | 07 101 00 | Orizaba    | Orizaba    | Verac      | 30 118 00 | W121      | CAMION F | 1998      | DIESEL   | 0       | 2     |       |       |                |       |          |    |          |
| 19       | 2      | 1       | 0    | 82     |      | AUTOBUS E Coatzaco   | Coatzaco      | Verac      | 30 039 00 | Xalapa-En  | Xalapa     | Verac      | 30 087 00 | A115      | AUTOBUS  | 2005      | DIESEL   | 10      | 2     |       |       |                |       |          |    |          |
| 20       | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Jáltipan      | Jáltipan   | Verac     | 30 089 00  | Juchitán d | Juchitán d | Oaxac     | 20 043 00 | G974     | AUTOMOV   | 1995     | GASOLIN | 1     | 0     | P     | Paseo          |       |          |    |          |
| 21       | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Jáltipan      | Jáltipan   | Verac     | 30 089 00  | San Andrés | San Andrés | Verac     | 30 141 00 | C105     | AUTOMOV   | 1986     | GASOLIN | 1     | 0     | T     | Trabajo        |       |          |    |          |
| 22       | 2      | 1       | 0    | 245AN6 | 7    | CAMION DI Cancún     | Benito Juárez | Quint      | 23 005 00 | México     | México     | Distr      | 09 015 00 | W105      | CAMION I | 1992      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7503  | TUBERI/TUBERI  | 40    | PZ       |    | PIEZAS   |
| 23       | 2      | 1       | 0    | 245DK5 | 7    | CAMION DI Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Heroica P  | Puebla     | Puebl      | 21 114 00 | W105      | CAMION I | 1982      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 3022  | HUEVO/HUEVO    | 0     | G        |    | GRANEL   |
| 24       | 2      | 1       | 0    | X59166 | 7    | CAMION DI Tuxtla Gut | Tuxtla Gut    | Chiap      | 07 101 00 | Oluta      | Oluta      | Verac      | 30 116 00 | W133      | CAMION F | 2004      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 3019  | OTRAS / POLLOS | 500   | C        |    | CABEZAS  |
| 25       | 2      | 1       | 0    | 537AJA | 15   | TRACTOR E Cosoleaca  | Cosoleaca     | Verac      | 30 048 00 | Reynosa    | Reynosa    | Tamau      | 28 032 00 | W113      | CAMION F | 2001      | DIESEL   | 0       | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 26       | 2      | 1       | 0    | 82     |      | AUTOBUS E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | San Pedro  | San Pedro  | Oaxac      | 20 324 00 | A115      | AUTOBUS  | 2004      | DIESEL   | 17      | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 27       | 2      | 1       | 0    | 816EE4 | 11   | TRACTOR E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | Apizaco    | Apizaco    | Tlaxc      | 29 005 00 | W123      | CAMION I | 2000      | DIESEL   | 0       | 1     |       |       |                |       |          |    |          |
| 28       | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Minatitlán    | Minatitlán | Verac     | 30 108 00  | San Andrés | San Andrés | Verac     | 30 141 00 | G313     | AUTOMOV   | 2005     | GASOLIN | 3     | 0     | T     | Trabajo        |       |          |    |          |
| 29       | 2      | 1       | 0    | 470EE3 | 11   | TRACTOR E Villaherm  | Centro        | Tabas      | 27 004 00 | México     | México     | Distr      | 09 015 00 | W113      | CAMION F | 1999      | DIESEL   | 0       | 2     |       | 2068  | PLATAN PLATAN  | 1200  | PZ       |    | PIEZAS   |
| 30       | 2      | 1       | 0    | A      |      | AUTOMOV              | Oteapan       | Oteapan    | Verac     | 30 120 00  | Acayacan   | Acayacan   | Verac     | 30 003 00 | C401     | AUTOMOV   | 2006     | GASOLIN | 2     | 0     | T     | Trabajo        |       |          |    |          |
| 31       | 2      | 1       | 0    | 09508  | 7    | CAMION DI Coatzaco   | Coatzaco      | Verac      | 30 039 00 | Veracruz   | Veracruz   | Verac      | 30 193 00 | W106      | CAMION I | 2008      | DIESEL   | 0       | 3     |       |       |                |       |          |    |          |
| 32       | 2      | 1       | 0    | 081AU3 | 9    | TRACTOR E Cancún     | Benito Juárez | Quint      | 23 005 00 | Toluca de  | Toluca     | Méxic      | 15 106 00 | W121      | CAMION F | 2003      | DIESEL   | 0       | 1     |       | 7391  | MOTOCMOTOS     | 40    | PZ       |    | PIEZAS   |

Vista parcial del archivo original de pesaje dinámico correspondiente a la estación Zacatal (2011), antes del proceso de limpieza de datos.

# Caso Estudio – Estación Zacatal (EECAN)



|    | A        | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     | J     | K     |
|----|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | VEHICULO | PBV   | Eje 1 | Eje 2 | Eje 3 | Eje 4 | Eje 5 | Eje 6 | Eje 7 | Eje 8 | Eje 9 |
| 2  | C2       | 7662  | 3425  | 4237  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 3  | C2       | 7145  | 2898  | 4247  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 4  | C2       | 6765  | 1783  | 4982  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 5  | C2       | 5866  | 2147  | 3719  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 6  | C2       | 7612  | 2847  | 4765  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 7  | C2       | 11286 | 3285  | 8001  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 8  | C2       | 6992  | 2724  | 4268  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 9  | C2       | 5692  | 1910  | 3782  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 10 | C2       | 12270 | 4537  | 7733  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 11 | C2       | 19543 | 10827 | 8716  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 12 | C2       | 5793  | 2019  | 3774  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 13 | C2       | 6872  | 2808  | 4064  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 14 | C2       | 9334  | 3602  | 5732  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 15 | C2       | 10139 | 4336  | 5803  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 16 | C2       | 9176  | 3084  | 6092  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 17 | C2       | 11472 | 3959  | 7513  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 18 | C2       | 6743  | 1850  | 4893  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 19 | C2       | 6252  | 3088  | 3164  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 20 | C2       | 5443  | 1736  | 3707  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 21 | C2       | 6218  | 2426  | 3792  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 22 | C2       | 13830 | 5218  | 8612  | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |

Archivo limpio con clasificación vehicular y distribución de carga por eje individual

# Metodología y Aplicación

- ▼  Espectros de carga
  - >  Sencillo
  - >  Sencillo dual
  - >  Tándem
  - ▼  Tridem
    -  Resultados espectro de carga.xlsx
    -  Espectro de carga eje tridem.png
    -  Ajuste log normal tridem.png
    -  Gráfico de distribución porcentual.png
    -  Gráfica de dispersión kmeans.png
    -  Tabla parámetros estadísticos de la carga.png

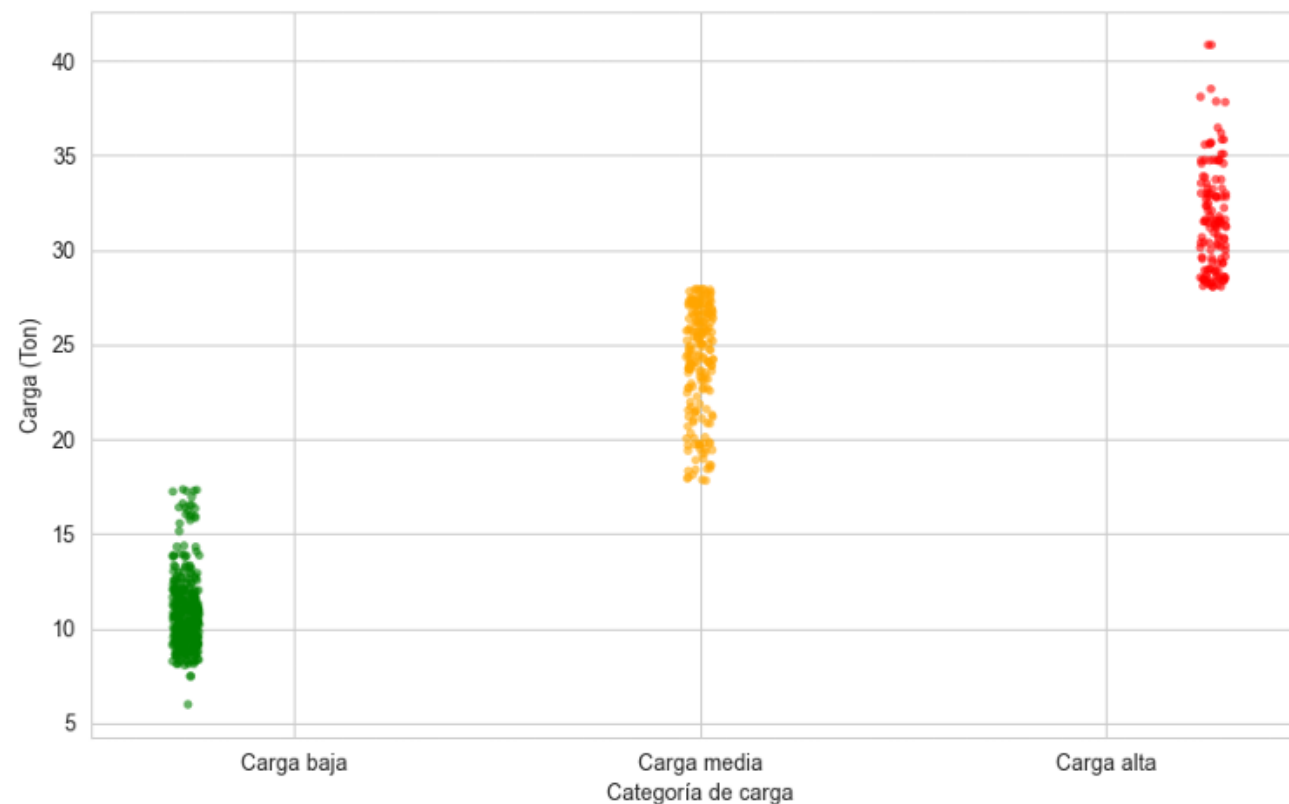
Archivos generados para el análisis de  
espectros de carga

# Agrupar para entender: el poder de K-Means

## K-means

**K-Means** es un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado que organiza información en grupos (clústeres) según sus características, sin instrucciones previas sobre cómo clasificarla. Su objetivo es encontrar patrones y formar conjuntos con elementos que se parezcan entre sí.

# Metodología y Aplicación

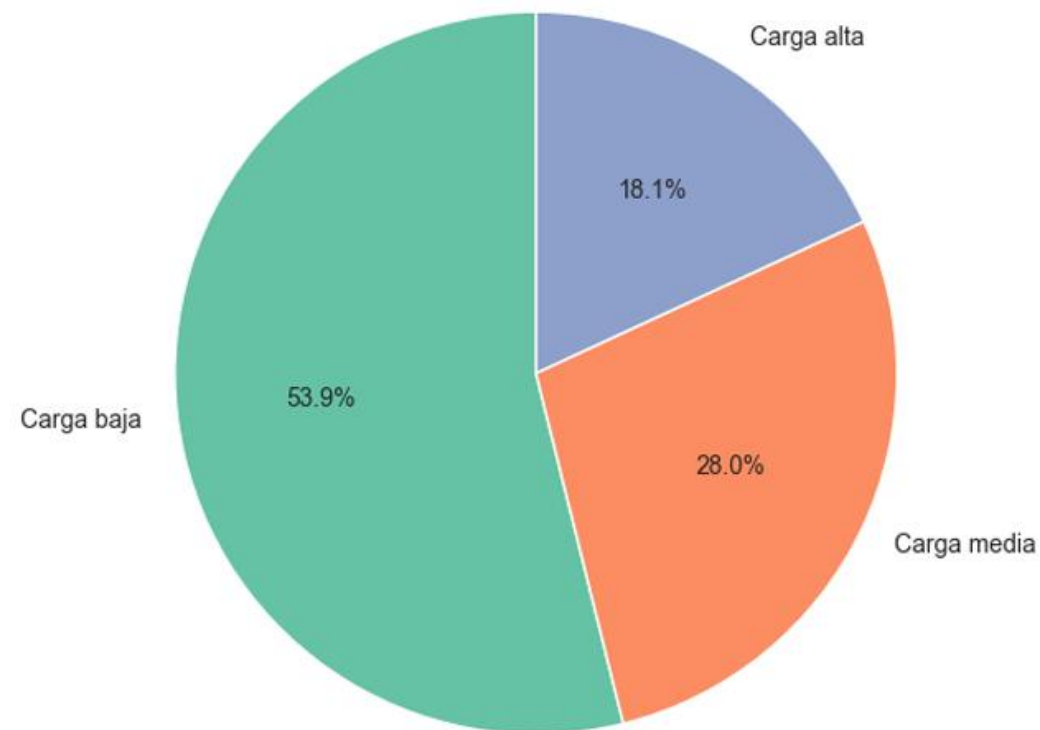


Clasificación de cargas del eje tridem en categorías baja, media y alta

# Metodología y Aplicación

| Categoría de carga | count | min    | max    | mean   | std   |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Carga baja         | 381   | 5.981  | 17.347 | 10.787 | 1.952 |
| Carga media        | 198   | 17.817 | 27.942 | 24.209 | 2.869 |
| Carga alta         | 128   | 28.070 | 40.842 | 31.702 | 2.832 |

Distribución porcentual de las categorías de carga para el eje tridem



# Random Forest: La fuerza del consenso

---

**Random Forest** es un algoritmo supervisado que combina varios árboles de decisión para mejorar la precisión. Cada árbol aporta su opinión, y el modelo elige la respuesta más consensuada.

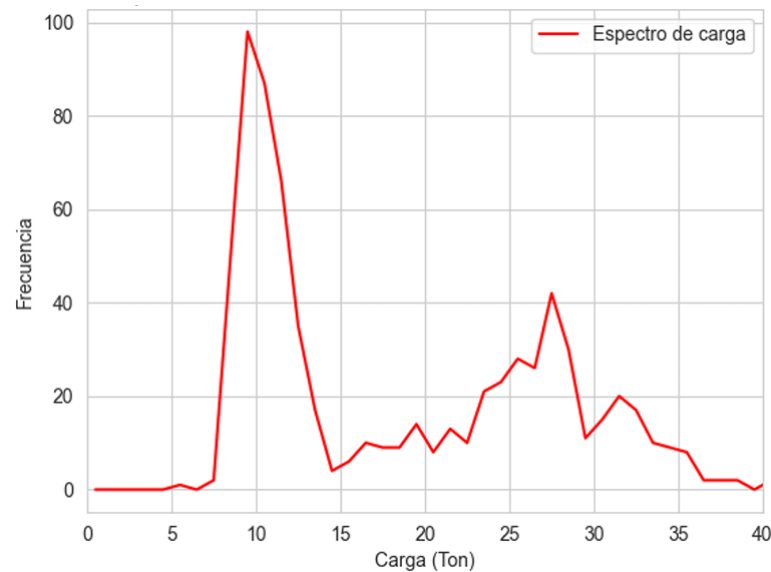
# Visualización Inteligente

La API produce visualizaciones para interpretar el comportamiento de las cargas vehiculares.

## Gráfica del espectro de carga:

- Muestra la frecuencia de los pesos por eje en intervalos.
- Permite identificar concentraciones de tránsito y evaluar la distribución general.

## Ejemplo



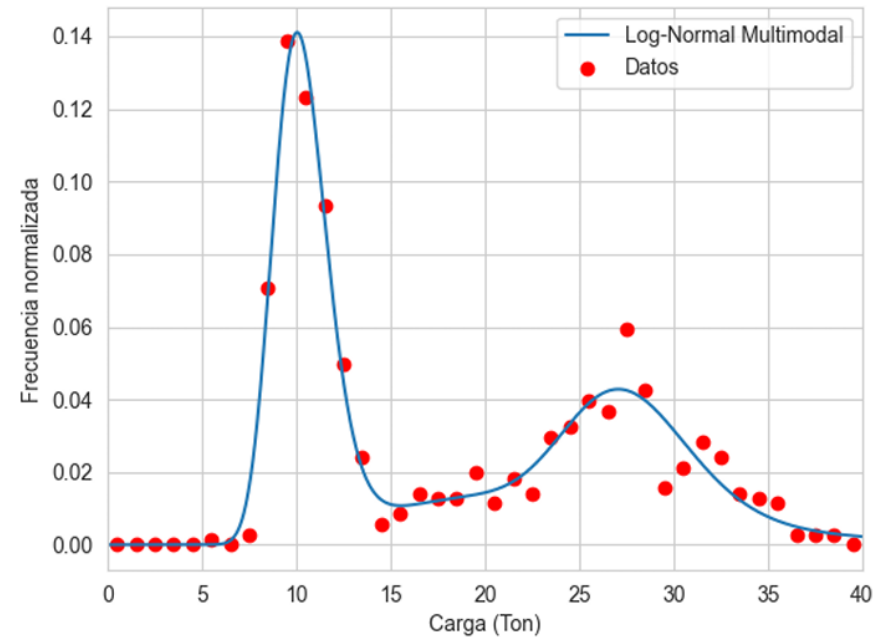
# Visualización Inteligente

## Gráfica de ajuste log-normal multimodal:

Superpone el modelo estadístico ajustado sobre los datos normalizados.

Facilita la validación visual del modelo y la identificación de los modos principales.

## Ejemplo



# Metodología y Aplicación

## Generación del archivo Excel

### Hoja 1

Espectro de carga, contiene la información completa del espectro para el tipo de eje analizado. Se incluye:

- El peso bruto del eje junto con el vehículo del cual proviene
- Los límites de clase
- Frecuencia absoluta
- Frecuencia normalizada
- Distribución ajustada con función log-normal
- Diferencias entre datos reales y ajustados

# Metodología y Aplicación

## Generación del archivo Excel

### Hoja 2

Parámetros del ajuste log-normal multimodal. Se listan las tres medias, tres desviaciones estándar y tres pesos que definen el modelo estadístico ajustado a los datos, además del error cuadrático medio y coeficiente de correlación del ajuste

| Parámetro                  | Valor   |
|----------------------------|---------|
| Media 1                    | 3.139   |
| Desviación estándar 1      | 0.347   |
| Peso 1                     | 0.253   |
| Media 2                    | 2.325   |
| Desviación estándar 2      | 0.139   |
| Peso 2                     | 0.493   |
| Media 3                    | 3.322   |
| Desviación estándar 3      | 0.118   |
| Peso 3                     | 0.254   |
| Diferencias al cuadrado    | 0.00148 |
| Coeficiente de correlación | 0.988   |

# Metodología y Aplicación

## Generación del archivo Excel

### Hoja 3

Métricas globales. Resume los indicadores clave del espectro, incluyendo:

- El Factor del Espectro de Carga (LSF)
- ESALs (Ejes Equivalentes)
- Número total de ejes

| Propiedad            | Valor |
|----------------------|-------|
| LSF                  | 1.089 |
| ESALs                | 771   |
| Número total de ejes | 707   |

# Factor del Espectro de carga (LSF)

El daño al pavimento se acumula con cada pasada de un eje, y al sumar estos daños podemos conocer el impacto total que las cargas ejercen sobre la vía. El **Factor de Espectro de Carga (LSF, por sus siglas en inglés)** nos permite identificar cuánto contribuye cada tipo de eje a ese daño acumulado.

Empleando la ecuación :

$$LSF = \sum_{r=1}^R \left( \frac{X_r}{L_s} \right)^m q_r$$

En donde:

**R** es el número total de intervalos de carga

***X<sub>r</sub>*** es la carga del eje en cuestión

***L<sub>s</sub>*** es la carga del eje estándar con el mismo numero de ejes que ***X<sub>r</sub>***

***m*** potencia a la que se eleva el daño relativo

***q<sub>r</sub>*** es la frecuencia normalizada de carga o el ancho de clase

# Metodología y Aplicación

---

## Generación del archivo Excel

### Hoja 4

Ejes legales (menores o iguales al límite permitido). Presenta los ejes clasificados como legales de acuerdo con la carga máxima permitida definida por el usuario.

### Hoja 5

Ejes ilegales (mayores al límite permitido). Muestra únicamente aquellos ejes que exceden la carga máxima normativa, identificados como ilegales.

# Metodología y Aplicación

## Generación del archivo Excel

### Hoja 6

Estadísticos del grupo legal. Incluye métricas descriptivas del subconjunto de cargas legales:

- LSF del grupo
- Número de ejes
- Media, desviación estándar
- Valores mínimos, máximos
- Cuartiles (P25, P50, P75)

| Parámetro | Valor  |
|-----------|--------|
| LSF       | 0.084  |
| count     | 439    |
| mean      | 12.05  |
| std       | 3.76   |
| min       | 5.981  |
| 25%       | 9.601  |
| 50%       | 10.805 |
| 75%       | 12.625 |
| max       | 22.954 |

# Metodología y Aplicación

## Generación del archivo Excel

### Hoja 7

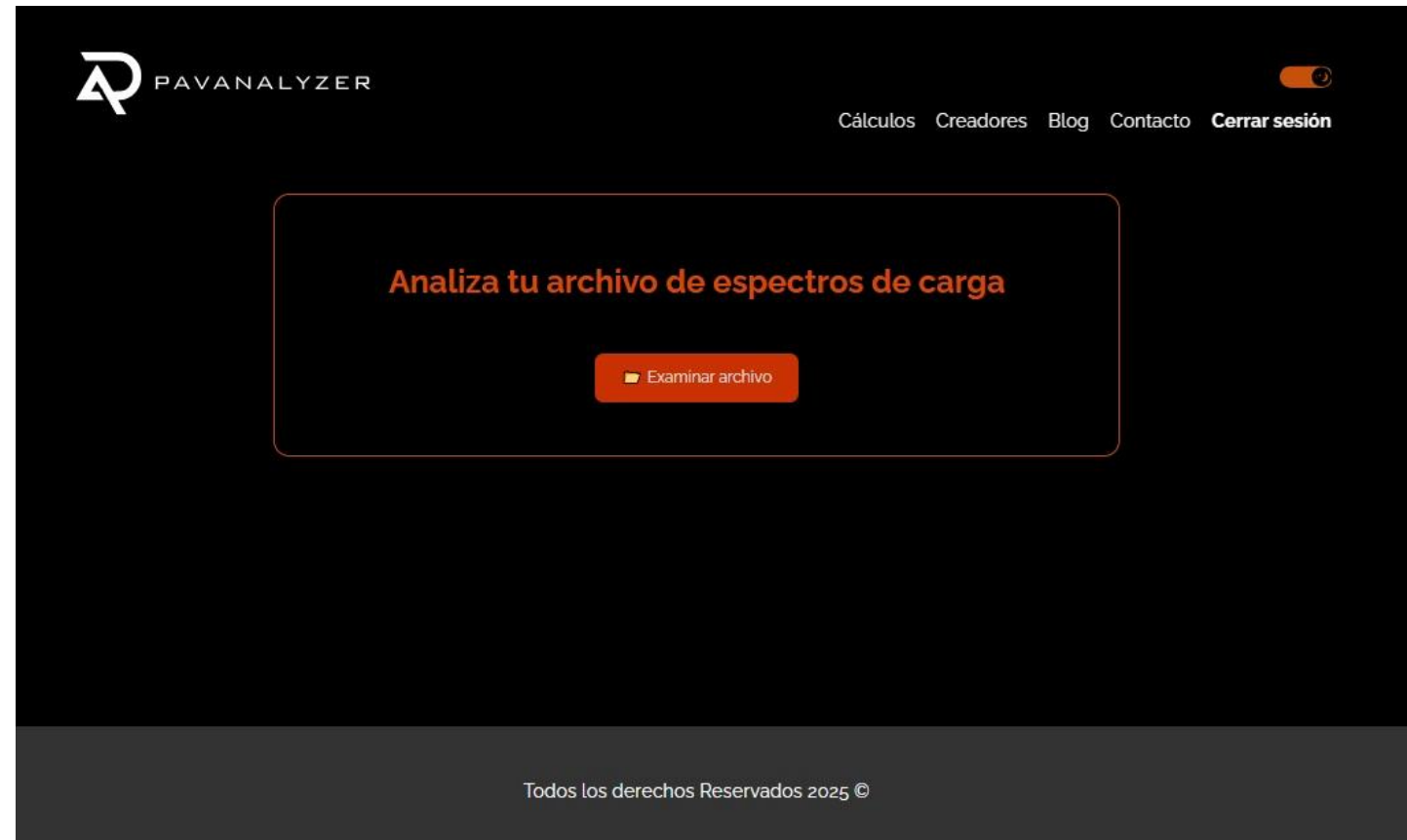
Estadísticos del grupo ilegal. Presenta los mismos parámetros estadísticos que la hoja anterior, pero para el subconjunto de cargas clasificadas como ilegales.

| Parámetro | Valor      |
|-----------|------------|
| LSF       | 1.005      |
| count     | 268        |
| mean      | 28.6173396 |
| std       | 3.6883202  |
| min       | 23.068     |
| 25%       | 25.755     |
| 50%       | 27.859     |
| 75%       | 31.3005    |
| max       | 40.842     |

# Una herramienta clave para el futuro



# Una herramienta clave para el futuro

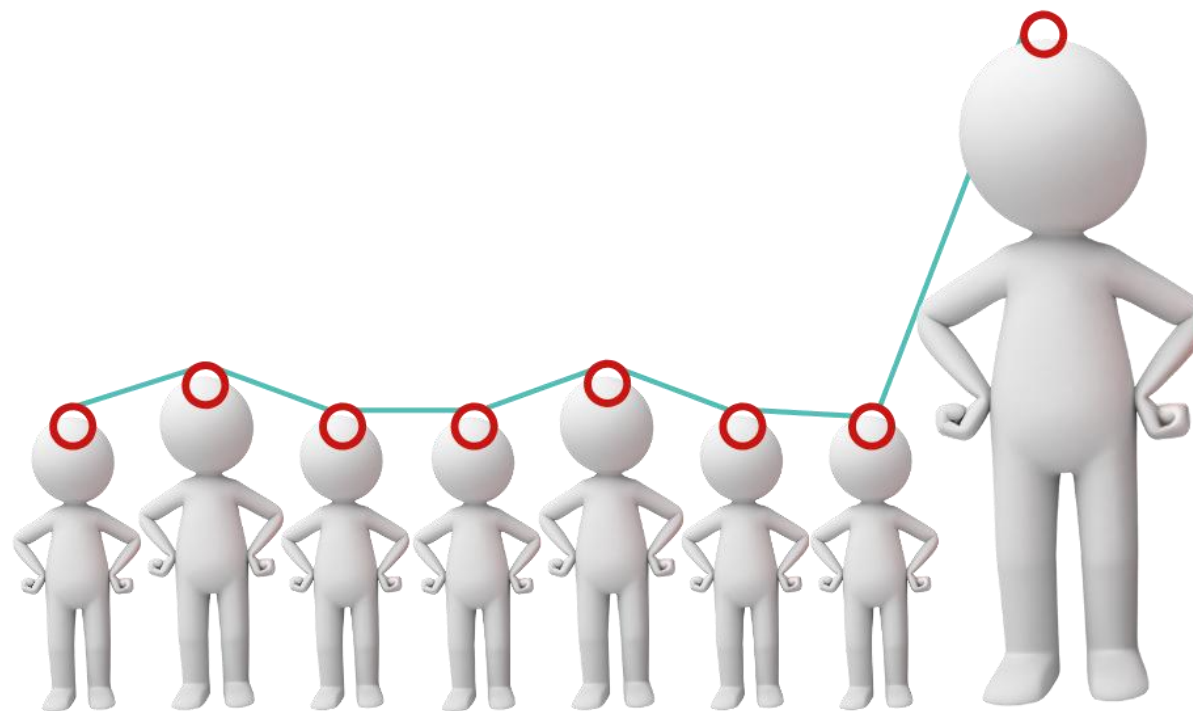


# Una herramienta clave para el futuro



# Outlier: La señal en la excepción

Es un valor que se aparta notablemente del comportamiento normal de un conjunto de datos. Puede deberse a **errores**, **variaciones naturales** o **situaciones inusuales**. Identificarlo ayuda a entender mejor la información, mejorar los análisis y tomar decisiones más acertadas.



# Conclusiones

---

- **Automatización avanzada:** La API analiza espectros de carga vehicular en segundos, reduciendo drásticamente el tiempo frente a métodos manuales.
- **Eficiencia comprobada:** Con el caso Zacatal se logró el procesamiento de 1.2 millones de datos en solo 70 segundos.
- **Precisión con Machine Learning:** Uso de Random Forest (clasificación) y KMeans (segmentación) para caracterización robusta del tránsito pesado.
- **Optimización de datos:** Depuración de grandes volúmenes; de 30,287 a 7,849 filas útiles listas para análisis técnico.

# Conclusiones

---

- **Resultados estructurados:** Espectros por eje, parámetros estadísticos, segmentación de cargas y clasificación normativa diseñado para facilitar interpretación
- **Visualizaciones exportables:** Gráficos de dispersión, espectros y ajustes log-normales listos para reportes y toma de decisiones
- **Mayor confiabilidad:** Minimiza errores humanos y reduce incertidumbre en evaluaciones técnicas.
- **Impacto estratégico:** Optimiza mantenimiento, extiende vida útil y fomenta infraestructura sostenible.

# Conclusiones

---

Esta API no solo interpreta datos: **descifra patrones, anticipa necesidades y fortalece nuestras decisiones.**

Es una alianza entre inteligencia artificial e ingeniería, donde el algoritmo se encarga de lo repetitivo y el ingeniero se enfoca en lo trascendental: diseñar, optimizar, decidir.

Porque cuando integramos la automatización, evolucionamos la forma en que concebimos nuestras carreteras.

Este no es el futuro, este es **el presente de la ingeniería vial.**

*¡muchas gracias!*

**Ponente:** M. I. Fernando Trejo

**Contacto:** [contacto@pavanalyzer.com](mailto:contacto@pavanalyzer.com)



PAVANALYZER