

ARTÍCULO ORIGINAL

Propuesta de sistema adaptativo para intersecciones semaforizadas en la ciudad de Jaén

Proposal of an adaptive system for traffic signalized intersections in the city of Jaén

José Piedra¹ 

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo, realizar la propuesta de un sistema adaptativo para intersecciones semaforizadas en la ciudad de Jaén, basado en algoritmos y ejecución de un programa. El diseño del estudio fue cuantitativa y experimental. Por tanto, se hizo una recolección y análisis de datos de campo y fuentes primarias, para posterior construir algoritmos con la metodología Knowledge Discovery Databases, pasando a crear una base de información, entrenar y validar con algoritmos de predicción los modelos que incluyó variables seleccionadas, luego predecir tiempos, que clasifican a un nivel de servicio; y finalizar con el desarrollo de un programa usando Visual Studio compatible con los algoritmos generados, todo ello teniendo presente el método Webster y Highway Capacity Manual. Se clasificaron las intersecciones en su situación actual con demoras de 11.41, 8.32 segundos, y niveles de servicio "B", "A"; dos modelos de alta precisión empleando el algoritmo RandomForest con R^2 de 0.995 y 0.996, estimando tiempos de demora y ciclo óptimo; y un programa ejecutable adaptable que calcula y optimiza demoras, ciclos óptimos y niveles de servicios. Este sistema tiene un R^2 del 99.55% con el algoritmo RandomForest capaz de estimar, mejorar y automatizar la operatividad en una intersección semaforizada.

Palabras clave: Sistema adaptativo, intersecciones semaforizadas, algoritmo, programa, demora.

ABSTRACT

The objective of the research was to propose an adaptive system for traffic signalized intersections in the city of Jaén, based on algorithms and program execution. The design of the study was quantitative and experimental. Therefore, field data and primary sources were collected and analyzed to later build algorithms using the Knowledge Discovery Databases methodology, going on to create an information base, train and validate with prediction algorithms the models that included selected variables, then predict times, which classify to a level of service; and finish with the development of a program using Visual Studio compatible with the generated algorithms, all this bearing in mind the Webster method and Highway Capacity Manual. The intersections were classified in their current situation with delays of 11.41 and 8.32 seconds, and levels of service "B", and "A"; two high precision models using the RandomForest algorithm with R^2 of 0.995 and 0.996, estimating delay times and optimal cycle lengths; and an adaptable executable program that calculates and optimizes delays, optimal cycles and levels of service. This system has an R^2 of 99.55% with the RandomForest algorithm capable of estimating, improving, and automating the operability of a traffic-light intersection.

Keywords: Adaptive system, traffic signalized intersections, algorithm, program, delay

* Autor para correspondencia

1 Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, Peru. Email: 2020812018@uns.edu.pe

INTRODUCCIÓN

El control del tráfico en las zonas urbanas es cada vez más con el crecimiento exponencial del número de vehículos. La ampliación de la red de carreteras para acomodar el aumento del número de vehículos no es una opción socialmente viable y es esencial aumentar la utilización de la infraestructura existente mediante una regulación adecuada del flujo de tráfico. Los semáforos se introdujeron para controlar el flujo del tráfico, mejorando así la seguridad de los usuarios. Sin embargo, estos crean cuellos de botella para el flujo de tráfico en los carriles que no tienen derecho de paso durante una fase específica y optimización de los tiempos de las señales para reducir el retraso global de todos los vehículos en la intersección. Con ello la optimización puede realizarse fuera de línea (programada previamente) o en línea (adaptativa) (Balaji et al., 2010, p. 177).

La ciudad de Jaén se encuentra actualmente experimentando un crecimiento constante en su población y en el número de vehículos que circulan por sus calles, lo cual ha generado un problema generalizado en todo el país: la congestión del tráfico. Esta situación refleja una gestión deficiente por parte de las autoridades actuales, agravada por los cambios en el sistema de transporte. Es crucial abordar este problema de manera específica, enfocándonos en todas las áreas que presentan deficiencias en lugar de generalizar. Un ejemplo claro de esto son las intersecciones en la ciudad, las cuales sufren de congestión, falta de control, problemas de seguridad, altos índices de accidentes y bajos niveles de servicio. En este contexto, se llevó a cabo un análisis enfocado en las intersecciones semaforizadas de Jaén, con el propósito de mejorar la circulación en el entorno urbano.

Ante esta problemática se emplearon algoritmos de predicción RandomForest, support vector machine (SVM), KNeighbors, Multi-Layer Perceptron (MLP) y Gradient Boosting, mediante la metodología Knowledge Discovery Databases (KDD) con sus fases: etapa de selección, preprocesamiento, transformación, minería de datos e intervención y evaluación de datos, el uso del lenguaje de programación Python, las bibliotecas Sklearn, Numpy, Pandas, Seaborn, Scikit-learn y la interfaz Jupyter Lab, y Visual Studio para crear un interfaz intuitiva para el usuario, para calcular y reducir las demoras en las intersecciones.

El objetivo de la investigación fue realizar la propuesta de un sistema adaptativo para intersecciones semaforizadas en la ciudad de Jaén, mediante el diagnóstico de dos intersecciones, parámetros, diseño de modelos mediante algoritmos que permitan la sustentabilidad y viabilidad del tránsito, elaborando un programa con una interfaz gráfica intuitiva basado en los datos de representación del algoritmo, que calcule y reduzca las demoras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Metodología

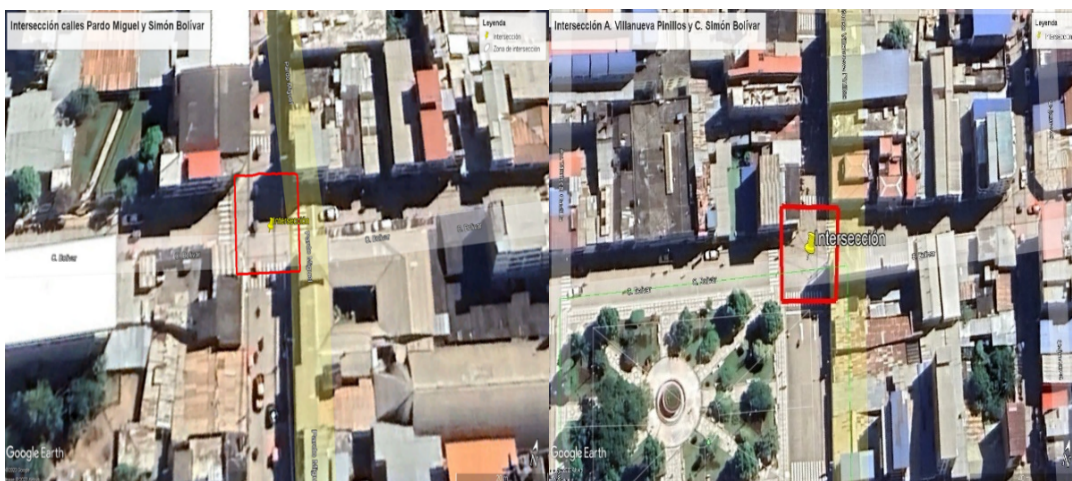
Se llevó a cabo la recopilación de datos mediante la grabación de videos en ubicaciones estratégicas dentro de las áreas de estudio. Posteriormente, se recopiló información acerca de las características geométricas, de tráfico y semaforicas de cada cruce, con el propósito de obtener los parámetros necesarios para el análisis. Se desarrollaron los algoritmos para la demora y el ciclo óptimo, tomando en consideración las fases de la metodología KDD, así como los métodos de Webster y HCM. A través de los algoritmos desarrollados, se llevó a cabo la creación y ejecución de un programa utilizando el entorno de Visual Studio y el lenguaje de programación Visual Basic .NET (VB.NET), con el objetivo de calcular y reducir los tiempos de demora y ciclo óptimo, y en consecuencia, mejorar el nivel de servicio en cada cruce.

Zona de estudio

Se seleccionaron dos intersecciones semaforizadas básicas en la ciudad, localizadas en un área comercial, en el Noroeste de la localidad de Jaén, con volúmenes vehicular variantes. El diagnóstico realizado en esta área de estudio: la primera intersección en las calles Simón Bolívar con Pardo Miguel, y una segunda intersección en la avenida Villanueva Pinillos con la calle Simón Bolívar. Estas intersecciones forman parte de una vía colectora principal y, en otra medida, de una vía local en Jaén (Ver Figura 1).

Figura 1

a) intersección de calles Pardo M. y Simón B., b) Av. Villanueva P. y calle Simón B.



Matriz de datos

Se creó una matriz de datos con 577 instancias y 16 variables extraídas de información científica; las variables fueron ancho de vía (ANV), tiempo de semáforo en verde (T), Flujo de saturación (ST), tiempo de ciclo (C), coeficiente de verde (Y), grado de saturación (X), flujo del carril (Q) y tiempo de demora

(DM), Número de Fases (NF), Número de carriles (NC), Factor de equivalencia (FE), Flujo vehicular directo (q), Flujo de saturación de la intersección (Yi), Tiempo total perdido por ciclo (P), Flujo peatonal (FP), Tiempo de ciclo optimo (Tco) (Ver Tabla 1).

Tabla 1*Descripción de las variables recolectadas*

| Variable | Descripción | Unidad | Tipo |
|--|---|------------------|----------|
| Ancho de la vía | Es la medida horizontal de la superficie de la carretera, desde un lado al otro. | m | Continua |
| Tiempo de semáforo en verde | Es el intervalo temporal durante el cual el semáforo permite el flujo ininterrumpido de vehículos en una dirección | s | Continua |
| Saturación | Es el volumen máximo por hora que puede pasar por una intersección con un carril en verde fijo durante una hora. | veh/h/ carril | Continua |
| Tiempo del ciclo | Es la duración completa de un ciclo de operación de un conjunto de semáforos en una intersección. | s | Discreta |
| Coefficiente de tiempo de verde | Representa la proporción del tiempo total de un ciclo de semáforo cuando está en fase verde. | - | Continua |
| Grado de saturación | Representa la proporción del flujo vehicular actual en comparación con la capacidad máxima de la carretera o intersección. | - | Continua |
| Flujo del carril | Es la cantidad de vehículos que pasan por un carril de una carretera o una vía en un período de tiempo específico | Veh/h | Continua |
| Tiempo de demora | Es el período de tiempo adicional que un vehículo experimenta al pasar por un punto específico en la red de transporte. | s | Discreta |
| Número de Fases | Es la cantidad de secuencias distintas de movimientos vehiculares y peatonales que son controladas por el ciclo completo del semáforo. | - | Discreta |
| Número de carriles | Es la cantidad de pistas disponibles para el flujo de vehículos en una carretera. | - | Discreta |
| Factor de equivalencia | Es el valor que se asigna al flujo para movimientos rectos (1) y derecha o izquierda (1.2). | - | Continua |
| Flujo vehicular directo | Es el flujo de automóviles directos, que no dan vuelta, equivalentes por hora | Veh/h | Continua |
| Flujo de saturación de la intersección | Es la máxima tasa de vehículos que puede pasar a través de una intersección regulada por semáforos. | Veh/h | Continua |
| Tiempo total perdido por ciclo | Es la multiplicación del número de fases por el tiempo de ámbar (3 a 4 s) | s | Discreta |
| Flujo Peatonal | Es la cantidad de personas que pasan durante un periodo determinado de tiempo | - | Discreta |
| Tiempo de ciclo optimo | Es el intervalo de tiempo más eficiente y equitativo que maximiza la capacidad y minimiza las demoras en una intersección regulada por semáforos. | s | Discreta |

La Tabla 2, muestra la estadística descriptiva de todas las variables de la base de datos, la variable "ANV" tiene un promedio de 5.73 con una desviación estándar de 1.05. La variable "T" exhibe un promedio de 19.84 con una desviación estándar de 4.33, mientras que "ST" presenta un promedio de 2968.29 con una desviación estándar de 602.02. Similarmente, la variable "C" tiene un promedio de 73.72 con una desviación estándar de 19.92. Las variables "Y" y "X" muestran promedios de 0.282 y 1.94 respectivamente, con desviaciones estándar de 0.07 y 1.01, y rangos de valores entre 0.158 y 0.441 para "Y", y entre 0.072 y 4.36 para "X". Por otro lado, "Q" tiene un promedio de 1519.23 con una desviación

estándar de 722.67, con valores que oscilan entre 64.51 y 2200. "DM", "NF", "NC", "FE", "q", "Yi", "P", "AP" y "Tco" exhiben promedios de 46.92, 5.13, 2.49, 1.14, 584.99, 0.325, 20.52, 37.53 y 60.47 respectivamente, con desviaciones estándar y rangos de valores específicos para cada variable.

Tabla 2*Estadística de las variables de la base de datos*

| Variable | Cantidad | Promedio | Desviación Estándar | Mínimo | 25% | 50% | 75% | Máximo |
|----------|----------|----------|---------------------|---------|---------|-------|-------|---------|
| ANV | 577 | 5.73 | 1.05 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7 |
| T | 577 | 19.84 | 4.33 | 10 | 16 | 19 | 23 | 29 |
| ST | 577 | 2968.29 | 602.02 | 1978.35 | 2536.95 | 3150 | 3675 | 3675 |
| C | 577 | 73.72 | 19.92 | 38 | 55 | 90 | 92 | 95 |
| Y | 577 | 0.282 | 0.07 | 0.158 | 0.237 | 0.283 | 0.321 | 0.441 |
| X | 577 | 1.94 | 1.01 | 0.072 | 1.18 | 2.05 | 2.61 | 4.36 |
| Q | 577 | 1519.23 | 722.67 | 64.51 | 902 | 2000 | 2010 | 2200 |
| DM | 577 | 46.92 | 27.27 | 8.03 | 19.67 | 49.78 | 69.33 | 107.29 |
| NF | 577 | 5.13 | 2.92 | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 |
| NC | 577 | 2.49 | 1.12 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| FE | 577 | 1.14 | 0.091 | 1 | 1 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| q | 577 | 584.99 | 366.17 | 16.8 | 252.15 | 593.5 | 803.6 | 1399.20 |
| Yi | 577 | 0.325 | 0.203 | 0.009 | 0.140 | 0.330 | 0.446 | 0.777 |
| P | 577 | 20.52 | 11.66 | 4 | 12 | 20 | 32 | 40 |
| AP | 577 | 37.53 | 7.42 | 21 | 31 | 38 | 43.75 | 50 |
| Tco | 577 | 60.47 | 39.99 | 11 | 30 | 51 | 80.75 | 213 |

Knowledge Discovery in Databases

Etapa de selección

Para la selección de los atributos, se analizó la distribución de cada variable. A continuación, se utilizó la biblioteca Sklearn en la interfaz Jupyter Lab y se ejecutó el algoritmo "RandomForest", que evalúa el valor de las variables midiendo la ganancia relativa a la variable de salida utilizando el comando "model.feature_importances_". Después de realizar el proceso de clasificación de atributos, se procedió a la elección de las variables cuyo peso superó el umbral de 0.5 (Ver Tabla 3).

Tabla 3*Variables seleccionadas que proporcionan la mayor información*

| Variable | Símbolo | Peso |
|--|---------|-------|
| Ancho de la vía | ANV | 0.63 |
| Tiempo de semáforo en verde | T | 0.52 |
| Saturación | ST | 0.65 |
| Tiempo del ciclo | C | 0.92 |
| Coefficiente de verde | Y | -0.80 |
| Grado de saturación | X | 0.93 |
| Flujo del carril | Q | 0.85 |
| Número de Fases | NF | 0.76 |
| Flujo vehicular directo | q | 0.62 |
| Flujo de saturación de la intersección | Yi | 0.63 |
| Tiempo total perdido por ciclo | P | 0.76 |

Preprocesamiento y limpieza

Durante la fase de recolección de datos, es habitual encontrar la matriz de datos con instancias nulas o que presentan anomalías, lo que introduce ruido en el proceso de extracción de conocimientos. Para resolver este problema, se aplicó un procedimiento de limpieza de datos con el fin de mejorar su calidad. Este proceso se realizó empleando el lenguaje de programación Python, mediante la interfaz Jupyter Lab junto con las bibliotecas Numpy, pandas y seaborn.

Transformación y reducción

Se procedió a la identificación de atributos con mayor representación de datos asociados al tiempo de demora y ciclo óptimo, empleando métodos de transformación destinados a la disminución del número efectivo de variables. Asimismo, se llevaron a cabo estrategias para la obtención de representaciones invariables respecto a los datos mediante el empleo de técnicas estadísticas (Ver Tabla 4).

Tabla 4
Grupo de variables de acuerdo a su importancia

| Grupo | Variables |
|-------|---|
| MP_1 | Ancho de la vía, Tiempo de semáforo en verde, Saturación, Tiempo del ciclo, Coeficiente de verde, Grado de saturación, Flujo del carril |
| MP_2 | Número de Fases, Flujo vehicular directo, Flujo de saturación de la intersección, Tiempo total perdido por ciclo |
| MP_3 | Ancho de la vía, Tiempo del ciclo, Coeficiente de verde, Grado de saturación, Flujo del carril |
| MP_4 | Número de Fases, Flujo de saturación de la intersección, Tiempo total perdido por ciclo |
| MP_5 | Tiempo del ciclo, Coeficiente de verde, Grado de saturación, Flujo del carril |

Minería de datos

Se empleó el lenguaje de programación Python, mediante la interfaz de JupyterLab junto con el paquete Scikit-learn 1.1.2, diseñado específicamente para aplicaciones de aprendizaje automático en Python. Este engloba una amplia gama de algoritmos de aprendizaje automático, que abarcan técnicas supervisadas y no supervisadas, presentadas de forma cohesionada a través de una interfaz uniforme y centrada en las tareas. Los algoritmos de predicción empleados para el entrenamiento y la extracción de patrones fueron RandomForest, support vector machine (SVM), KNeighbors, Multi-Layer Perceptron (MLP) y Gradient Boosting. Estos se caracterizan por sus tres componentes de representación del conocimiento, evaluación y búsqueda, mantienen un equilibrio, minimizando el sesgo sin afectar a la varianza, adaptándose a diversos tipos de datos. Posteriormente, se configuraron los hiperparámetros, como se indica en la Tabla 5, para garantizar la optimización del rendimiento y la generalización del modelo.

Tabla 5
Configuración de los hiperparámetros de los algoritmos

| Algoritmo | Hiperparámetros |
|------------------------|---|
| RandomForest | n_estimators = 50, max_depth = None, min_samples_split = 3, min_samples_leaf=2, random_state=42 |
| Support Vector Machine | Kernel = rbf, C = 1.0, Epsilon = 0.1, Gamma = scale |
| KNeighbors | n_neighbors = 5, weights = uniform, algorithm = auto leaf_size = 30 |
| Multi-Layer Perceptron | hidden_layer_sizes = 100 activation = relu, solver = adam, alpha = 0.0001, learning_rate = constant, max_iter = 100 |
| Gradient Bossting | n_estimators = 10, learning_rate = 0.2, max_depth = 2, min_samples_split = 4, min_samples_leaf = 1, subsample = 1.0 |

Intervención y evaluación de datos

Tras el entrenamiento de los grupos MP_1, MP_2, MP_3, MP_4 y MP_5 con la base de datos adquirida y los modelos de minería, se llevó a cabo un análisis comparativo de los resultados predichos frente a los valores reales utilizando métricas de rendimiento, error cuadrático medio (RMSE), cuadrados totales del error (SSE), coeficiente de determinación (R^2) y error relativo (RE), ver ecuaciones (1)-(4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Y_t - P_t)^2}{T}} \quad (1)$$

$$SSE = \sum_{t=1}^T (P_t - \bar{P}_t)^2 \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Y_t - P_t)^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{P}_t)^2} \quad (3)$$

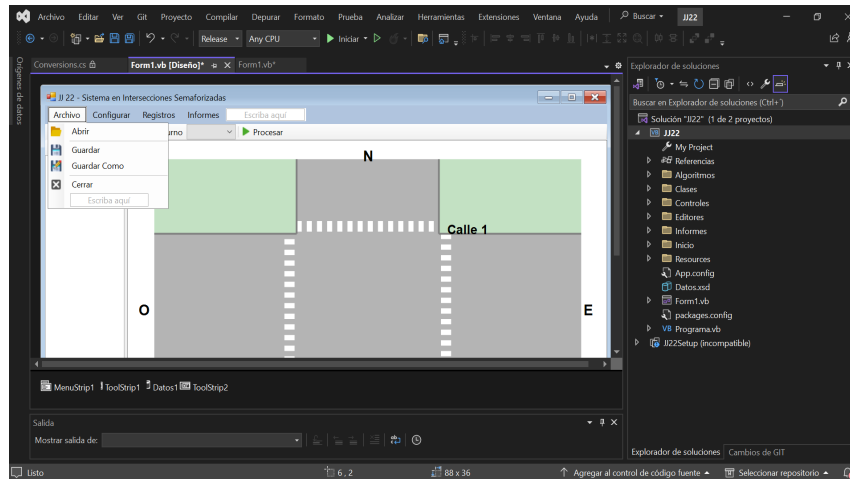
$$RE = \left| \frac{R_{real} - R_{simul}}{R_{real}} \right| \times 100 \quad (4)$$

Programa

Se desarrolló el programa JJ22, empleando la máquina virtual Framework .net, el Entorno de desarrollo integrado o IDE (Integrated Development Enviroment) de Visual Studio Community 2022 y el lenguaje de programación Microsoft Visual Basic .NET (VB.NET). Generando la interfaz con las herramientas de editor de iconos, y personalización de controles de Visual Studio, se agregaron los elementos "Archivo",

"Configurar", "Registros", "Informes", "Vehículos", "Turno", "Procesar" y "Fases". Estos elementos tienen diferentes funcionalidades para la gestión y control de intersecciones semaforizadas, incluyendo la configuración de parámetros, el registro de datos, la generación de informes y la gestión de vehículos y turnos (Ver Figura 2).

Figura 2
Creación de sub ventanas en cada pestaña del programa



RESULTADOS

Caracterización y análisis del accionar de las intersecciones

El análisis inicial para validar el algoritmo requirió examinar la presencia y eficacia de la señalización en dos intersecciones semaforizadas consideradas como puntos base en la ciudad. Estas intersecciones (Figura 3), fueron: la primera intersección a) calles Simón Bolívar con Pardo Miguel, con coordenadas UTM Norte (N): 9368514 y Este (E): 742668. y la segunda intersección está en b) la avenida Villanueva Pinillos con la calle Simón Bolívar, con coordenadas UTM Norte (N): 9368578 y Este (E): 742834.

Figura 3
Control y señalización en las dos intersecciones a) y b)

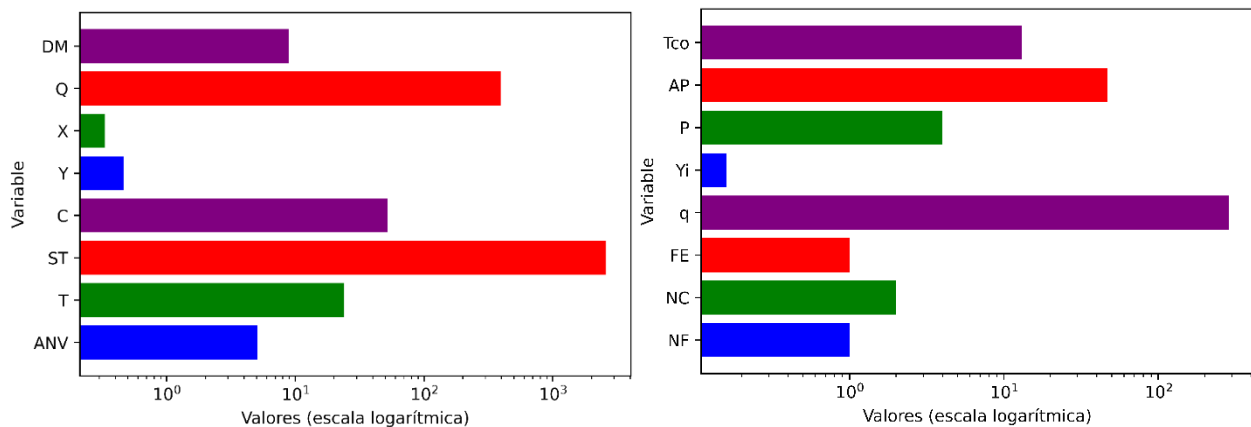


Matriz de datos

La matriz de datos fue conformada por 577 instancias y 16 variables extraídas de información científica, proporcionando una base sólida para la investigación. La primera base de datos se recolecto en función de las variables que influyen en el tiempo de demora y la segunda en función de variables que influyen en el tiempo de ciclo optimo (Ver Figura 4). Estas incluyen las características las cuales abarcan un espectro integral de factores relevantes para estudio del tránsito en intersecciones.

Figura 4

Base de datos de las variables que influyen en el tiempo de demora y tiempo de ciclo óptimo



Metodología KDD

Después de entrenar y validar los modelos MP_1, MP_2, MP_3, MP_4 y MP_5, distribuidos en dos grupos para determinar el tiempo de demora (MP_1, MP_3 y MP_5) y para el cálculo del tiempo de ciclo óptimo (MP_2 y MP_4) con los algoritmos RandomForest, Support, Vector Machine (SVM), KNeighbors, Multi-Layer Perceptron (MLP) y Gradient Bossting se obtuvo los siguientes estadísticos R y R².

Modelo MP_1 y MP_2

El modelo MP_1 se conformó por el Ancho de la vía, Tiempo de verde, Saturación, Tiempo del ciclo, Coeficiente de verde, Grado de saturación, Flujo del carril. El MP_2 por el Número de Fases, Flujo vehicular directo, Flujo de saturación de la intersección, Tiempo total perdido por ciclo.

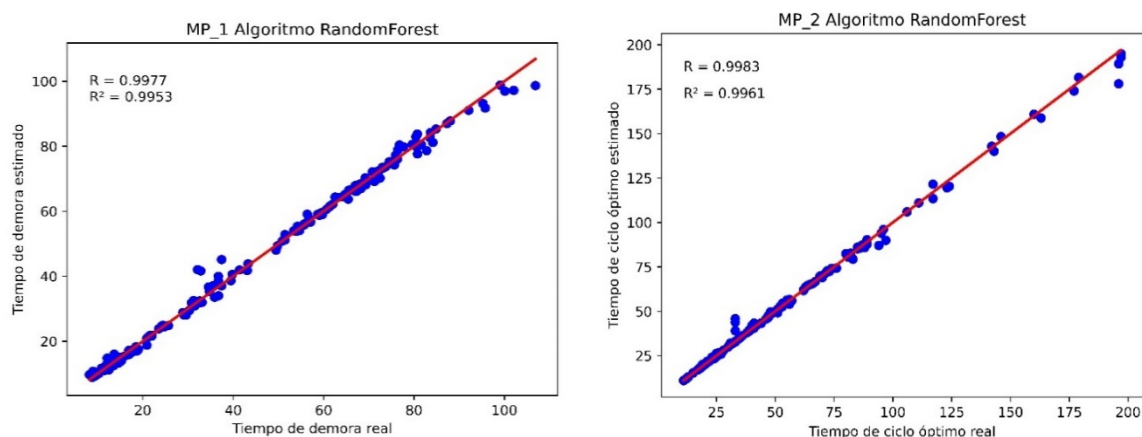
Tabla 6

Estadísticos de precisión de los algoritmos de los modelos

| Algoritmos | MP 1 (R) | MP 1 (R ²) | MP 2 (R) | MP 2 (R ²) |
|-------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|
| RandomForest | 0.998 | 0.995 | 0.998 | 0.996 |
| Support, Vector Machine | 0.846 | 0.689 | 0.638 | 0.325 |
| KNeighbors | 0.985 | 0.970 | 0.943 | 0.884 |
| Multi-Layer Perceptron | 0.895 | 0.788 | 0.957 | 0.893 |
| Gradient Bossting | 0.991 | 0.964 | 0.983 | 0.910 |

La Tabla 6, presenta los resultados de la aplicación de diferentes algoritmos de aprendizaje automático al conjunto de datos, evaluados mediante las métricas R y R^2 . Se observa que el MP_1 con el algoritmo RandomForest ha logrado un rendimiento alto, con valores de 0.998 y 0.995 para R y R^2 , y para el MP_2 también obteniendo valores de 0.998 y 0.996 para R y R^2 respectivamente (Ver Figura 5).

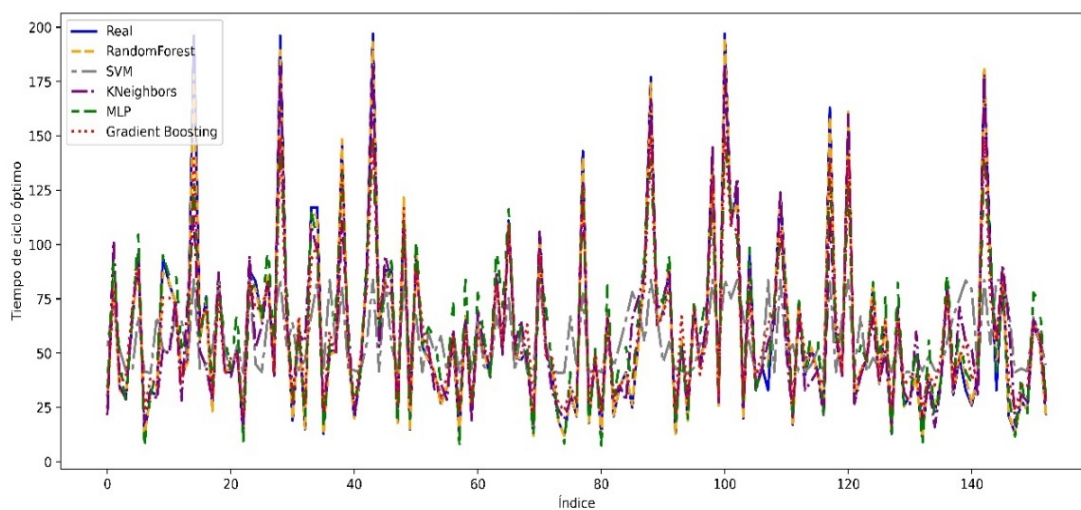
Figura 5
Precisión de los algoritmos del modelo MP_1 y MP_2



Validación de los algoritmos

Durante el proceso de entrenamiento, se observó que los modelos con alta precisión fueron el MP_1, empleando el algoritmo RandomForest, con un R^2 de 0.995 para la estimación del tiempo de demora, y el MP_2, con el algoritmo RandomForest, con un R^2 de 0.996 para la determinación del tiempo de ciclo óptimo (Ver Figura 6). Estos algoritmos se utilizaron para el desarrollo del programa, se guardaron en formato “joblib” y se exportaron a la extensión “ONNX”.

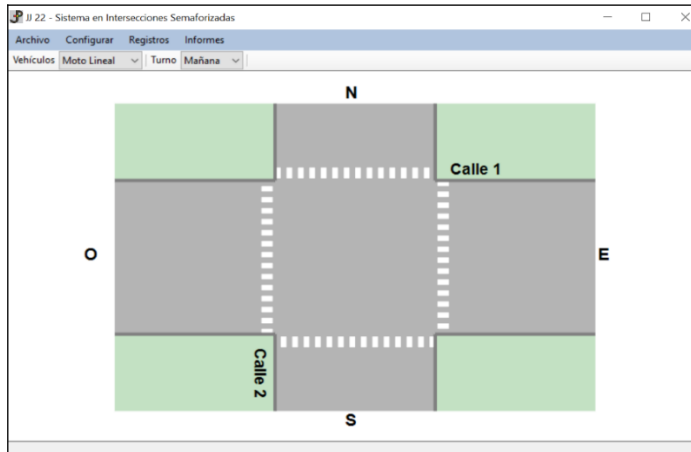
Figura 6
Validación de los cinco algoritmos del modelo



Interfaz de inicio del Programa

La interfaz contiene un conjunto de funcionalidades: la gestión de archivos, configuraciones personalizadas, registro de datos, generación de informes, configuración del tipo de vehículo, turnos y la gráfica de la intersección la cual muestra las condiciones asignadas para el análisis, mostrando los datos de flujo vehicular según el sentido, Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O), y el nombre de las calles (Ver Figura 7).

Figura 7
Pestañas multifuncionales del programa JJ22



Determinación del tiempo de demora

Para determinar el tiempo de demora, se accede a la pestaña de informes y se elige la sección denominada 'Demora actual'. A continuación, se selecciona el ícono de procesamiento, que utiliza el algoritmo previamente entrenado considerando las variables más significativas. Los resultados obtenidos se presentan en una sub ventana para cada sentido y en la parte inferior se proporciona información detallada sobre la demora total de la intersección y el nivel de servicio (Ver Figura 8).

Figura 8
Cálculo del tiempo de demora

The figure shows two screenshots of the 'Calculo de Demora' window. Both windows have a title bar 'Calculo de Demora' and a menu bar 'Analizar | Caso: Auto EQ - Turno: Tarde'. The first screenshot shows a table with the following data:

| Turno | Via | Sentido | Camiles | Ancho | Saturación | C | Y | X | Q | Demora | Nivel de Servicio |
|-------|---------------------|---------|---------|-------|------------|----|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Tarde | Calle Pardo Miguel | NS | 2 | 5.06 | 2685.673 | 52 | 0.4615 | 0.6492 | 774.64 | 11.486 | B |
| Tarde | Calle Pardo Miguel | SN | 2 | 5.06 | 2685.673 | 52 | 0.4615 | 0.7358 | 878.03 | 11.78 | B |
| Tarde | Calle Simón Bolívar | EO | 1 | 8.59 | 4509.75 | 52 | 0.4231 | 0.0942 | 179.68 | 9.192 | A |

Below the table, the summary statistics are: Demora de la Intersección: Demora: 11.8 Seg. Nivel de Servicio: B.

The second screenshot shows a similar table with the following data:

| Turno | Via | Sentido | Camiles | Ancho | Saturación | C | Y | X | Q | Demora | Nivel de Servicio |
|-------|-----------------------------|---------|---------|-------|------------|----|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| Tarde | Avenida Villanueva Pinillos | SN | 1 | 11.4 | 5985 | 47 | 0.4468 | 0.3031 | 810.5 | 9.633 | A |
| Tarde | Calle Simón Bolívar | EO | 1 | 9.52 | 4988 | 47 | 0.4295 | 0.1243 | 264.25 | 8.574 | A |

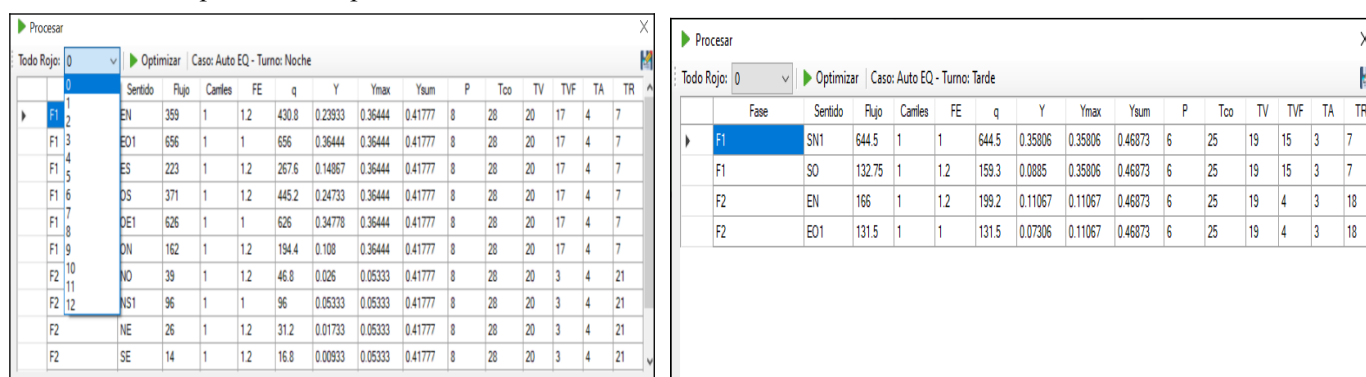
Below the table, the summary statistics are: Demora de la Intersección: Demora: 9.6 Seg. Nivel de Servicio: A.

Determinación del tiempo de ciclo óptimo

Se ingresa en la pestaña ‘Informes’ y se selecciona la sección ‘Optimizar ciclo’. Posteriormente se cargan los datos de la "Fase", "Sentido", "Flujo", "Carriles", "FE: Factor de equivalencia", "q: Flujo vehicular directo", "Y: Flujo de saturación", "Ymax: Flujo de saturación máxima", "Ysum: Sumatoria del flujo de saturación", "P: Tiempo total perdido por ciclo", "Tco: Tiempo de ciclo óptimo", "TV: Tiempo de total de verde", "TVF: Tiempo de verde de fase", "TA: Tiempo de ámbar de fase" y "TR: Tiempo de rojo de fase". Además, se puede habilitar un tiempo de todo rojo a las fases dentro de la intersección con diferentes valores según la literatura de 0 a 12 s (Ver Figura 9).

Figura 9

Cálculo del tiempo de ciclo óptimo



DISCUSIÓN

La selección de las intersecciones, trabajo de campo, y el control de los tiempos de luces de los semáforos y sus ciclos; compatibilizan con ALI et al. (2021) quienes seleccionaron su area de estudio, considerando la disponibilidad de datos reales, para el control de señales de tráfico con un método adaptativo; así mismo Celis-Peñaranda et al. (2016) y Savithramma et al. (2022), emplearon los datos de las señales, incluyendo la duración del ciclo en segundos, para el análisis de control adaptativo; An et al. (2022) seleccionaron dos intersecciones en Jungbu-daero en Yongin ciudad con diferentes duraciones de ciclo; concordando con Zhang et al. (2021) donde el ciclo de la intersección entre Fengze Road y Tianan South Road, en la provincia de Fujian tiene un período de 141 s; al igual que Bashiri (2020) que muestra una cantidad de 48 segundos para el ciclo del semáforo.

Las variables recolectadas para la base de datos son similares a las reportadas por diferentes investigadores, Shaikh et al. (2022), recogió las siguientes variables flujo vehicular, tasa del tráfico, longitud de la cola de vehículos, congestión y el retraso del vehículo para determinar el tiempo de ciclo mediante algoritmos genéticos. Qian et al. (2013) y Balaji et al. (2010), emplearon las variables número de vehículos, retraso medio y velocidad media actual del vehículo para crear un modelo con algoritmos

genéticos. Wijaya et al. (2019), recolectó las variables volumen de vehículos, duración del verde, amarillo y rojo, flujo de saturación y equivalente de pasajeros de automóvil para optimizar la eficacia de la duración de la señal en la intersección. Por otro lado, Olayode et al. (2022) utiliza variables de flujo de tráfico como variables de decisión, para su algoritmo generativo.

El tiempo de ciclo determinado por el algoritmo son similares a Shelby (2004), quien optimizó el tiempo fijo de Webster, mediante los algoritmos COP-97 y ALLONS-D, con una precisión del 90% reduciendo la demora del tráfico en una intersección de los Estados Unidos, Zhang et al. (2021), mediante algoritmos genéticos mejorados reduce el retardo de intersección en un 15.64% con alta precisión. Por otro lado, Support Vector Machine muestra valores más bajos de 0.638 y 0.325, sugiriendo un rendimiento limitado en comparación con RandomForest. KNeighbors exhibe un desempeño alto con R y R^2 de 0.943 y 0.884, mientras que Multi-Layer Perceptron y Gradient Boosting presentan resultados intermedios con R y R^2 de 0.957, 0.893 y 0.983, 0.910, respectivamente, similares a los obtenidos por Shamlitskiy et al. (2023), quien emplea redes neurales para optimizar el tiempo de ciclo óptimo con una precisión del 90%.

Las funciones elementales que contiene el programa: ingreso, cálculo e informes de desarrollo de la intersección semaforizada; son similares a las de Alkandari et al. (2014) el cual genera un sistema de control inteligente que se ejecuta mediante software de simulación, permitiendo opciones que el usuario puede controlar; corrobora con Jiajia & Xingquan (2020) que para su interfaz gráfica en su intersección única, los vehículos podrán ingresar desde 4 direcciones: este, oeste, sur y norte; similarmente con Doçi et al. (2022) que en su panel frontal (para su programa), se encuentra diseñado el tablero de control de intersección con elementos y variables importantes, en este panel se crean las variables de entrada/salida necesarias y otros parámetros de control de semáforos.

CONCLUSIONES

Se identificaron dos intersecciones semaforizadas base en la ciudad de Jaén, representativas de situaciones reales y actuales. Estas intersecciones fueron seleccionadas como zonas de estudio, donde se extrajeron y analizaron detalladamente sus condiciones de señalización, tanto vertical como horizontal, y de control, incluyendo la configuración de semáforos presincronizados. La información obtenida se integró en la base de datos y se utilizó para validar el sistema adaptativo propuesto.

Las intersecciones formadas por calles y por avenida-calle presentaron características geométricas basadas en dos carriles, con anchos promedio que variaron desde 4.44 m a 5.15 m y de 4.36 m a 6.70 m, y pendientes que oscilaron entre -0.027 y 0.015, y de -0.002 a 0.022, respectivamente. Según el enfoque

tradicional (Webster), se determinó y clasificó cada intersección en su situación actual, con demoras de 11.41 y 8.32 segundos, y niveles de servicio "B" y "A", respectivamente.

Con el empleo de la metodología Knowledge Discovery Databases (KDD), siendo su esencialidad la minería de datos, y siguiendo los patrones de sus fases, de los cinco modelos desarrollados y con el uso de cinco algoritmos de predicción para el entrenamiento, dos modelos lograron alta precisión empleando el algoritmo RandomForest con valores R^2 de 0.995 y 0.996, para predecir, uno de ellos tiempo de demora y el otro para tiempo de ciclo óptimo; siendo sustentables para usarse en la elaboración del programa.

Se plantearon algoritmos adaptativos que dieron lugar al diseño del programa "JJ22" en el entorno de Visual Studio Community 2022. Este proceso incluyó una fase de diseño que abarcó las interfaces gráficas para el inicio, ingreso de datos, cálculos e informes, y una fase de desarrollo que comprendió los códigos correspondientes a estas funcionalidades. El programa resultante es ejecutable y adaptable, ya que calcula y optimiza demoras, ciclos óptimos y niveles de servicio. Durante las pruebas realizadas en la intersección entre calles, el programa estimó y redujo los tiempos de ciclo óptimo y semafóricos, estableciéndolos en 28 segundos para las calles y 25 segundos para la avenida-calle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, M. E. M., Durdu, A., Celtek, S. A., & Yilmaz, A. (2021). *An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic With Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator*. 10.1109/ACCESS.2021.3094270
- Alkandari, A., Al-Shaikhli, I. F., & Alhaddad, A. (2014). Optimization of traffic control methods comparing with dynamic webster with Dynamic Cycle Time (DWDC) using simulation software. *2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, 1071-1076. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2014.6975989>
- An, H. K., Awais Javeed, M., Bae, G., Zubair, N., M. Metwally, A. S., Bocchetta, P., Na, F., & Javed, M. S. (2022). *Optimized Intersection Signal Timing: An Intelligent Approach-Based Study for Sustainable Models*. <https://doi.org/10.3390/su141811422>
- Balaji, P. G., German, X., & Srinivasan, D. (2010). Urban traffic signal control using reinforcement learning agents. *IET Intelligent Transport Systems*, 4(3), 177. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2009.0096>
- Bashiri, M. (2020). *Data-Driven Intersection Management Solutions for Mixed Traffic of Human-Driven and Connected and Automated Vehicles*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.05402>

- Celis-Peñaranda, J. M., Escobar-Amado, C. D., Sepúlveda-Mora, S. B., Castro-Casadiago, S. A., Medina-Delgado, B., & Ramírez-Mateus, J. J. (2016). *Control adaptativo para optimizar una intersección semafórica basado en un sistema embebido*. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.24.8>
- Doçi, I., Duraku, R., & Hoti, B. (2022). *Design Of Traffic Intersection Model And Regulation With Software And Microcontrollers*. https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full1a5_875407.pdf
- Jiajia, L., & Xingquan, Z. (2020). *Research on Fuzzy Control and Optimization for Traffic Lights at Single Intersection*. <https://www.china-simulation.com/EN/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0498>
- Olayode, O. I., Tartibu, L. K., & Okwu, M. O. (2022, enero 25). *Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Model on Traffic Flow of Vehicles at a Signalized Road Intersections*. ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-70956>
- Qian, R., Lun, Z., Wenchen, Y., & Meng, Z. (2013). A Traffic Emission-saving Signal Timing Model for Urban Isolated Intersections. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 2404-2413. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.269>
- Savithramma, R. M., Sumathi, R., & Sudhira, H. S. (2022). *A Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms in Design Process of Adaptive Traffic Signal Control System*. 10.1088/1742-6596/2161/1/012054
- Shaikh, P. W., El-Abd, M., Khanafer, M., & Gao, K. (2022). A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving the Traffic Signal Control Problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 48-63. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3014296>
- Shamlitskiy, Y., Popov, A., Saidov, N., & Moiseeva, K. (2023). Transport Stream Optimization Based on Neural Network Learning Algorithms. *Transportation Research Procedia*, 68, 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.056>
- Shelby, S. G. (2004). Single-Intersection Evaluation of Real-Time Adaptive Traffic Signal Control Algorithms. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1867(1), 183-192. <https://doi.org/10.3141/1867-21>
- Wijaya, D. D. A., Luckyarno, Y. F., Utami, S. S., & Prasetyo, R. (2019). *Analysis of Vehicle Waiting Time Efficiency Using Webster Method and Newton's Divided Difference: Case Study at Mirota Kampus Intersection, Yogyakarta, Indonesia*.
- Zhang, H., Yuan, H., Chen, Y., Yu, W., Wang, C., Wang, J., & Gao, Y. (2021). Traffic Light Optimization Based on Modified Webster Function. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, e3328202. <https://doi.org/10.1155/2021/3328202>