

Análisis de Coincidencia y Adherencia de Trayectorias a Plan de Vuelo utilizando Inteligencia Artificial

AdherNet



—Trabajo Fin de Máster —

Autor - Rubén González Velasco
Tutor académico - Antonio Jiménez Martín
Tutor interno CRIDA - Sergi Mas Pujol



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE INGENIEROS
INFORMÁTICOS



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

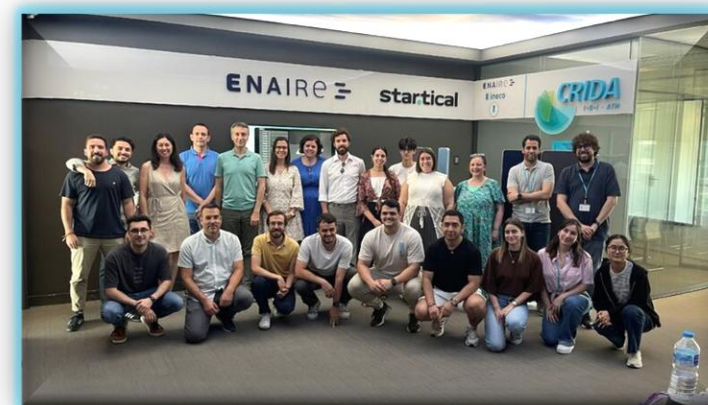


ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE INGENIEROS
INFORMÁTICOS

¿Qué es CRIDA A.I.E?

CRIDA A.I.E. es una agrupación de interés económico sin ánimo de lucro establecida por **ENAIRe**, la Universidad Politécnica de Madrid (**UPM**) e Ingeniería y Economía del Transporte, S.A. (**INECO**).

CRIDA tiene por misión **mejorar** la eficiencia y prestaciones del sistema de **gestión de tráfico aéreo** español por medio del desarrollo de ideas y proyectos de I+D+i.

**ENAIRe** **POLITÉCNICA** **ineco**

Acuerdos de Colaboración:

**indra****Isdefe** **AirEuropa****UAB**
Universitat Autònoma
de Barcelona**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Introducción

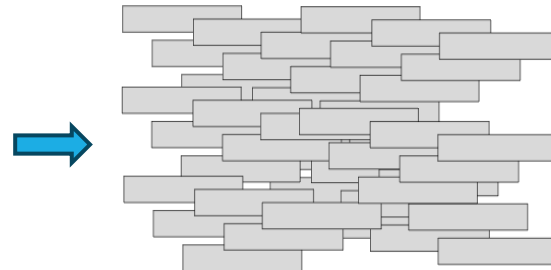
¿Por qué necesitamos medidas de similitud de trayectorias?



Datos reales de vuelo

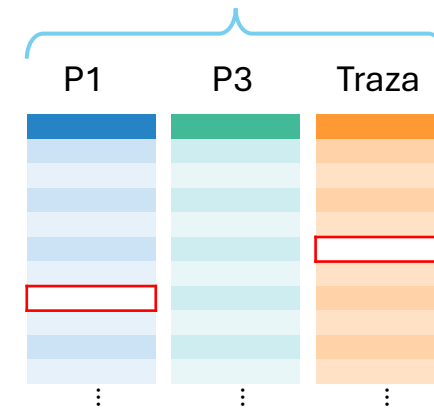
- Nacionales
 - Salen y Aterrizan en España
- Internacionales
 - Salen o Aterrizan en España
- Sobrevuelos
 - Pasan por espacio aéreo español

(del 1 de febrero al 31 de marzo de 2024)



Miles de Trayectorias

Datos asociados a vuelo y con forma de trayectoria



Tablas emparejadas

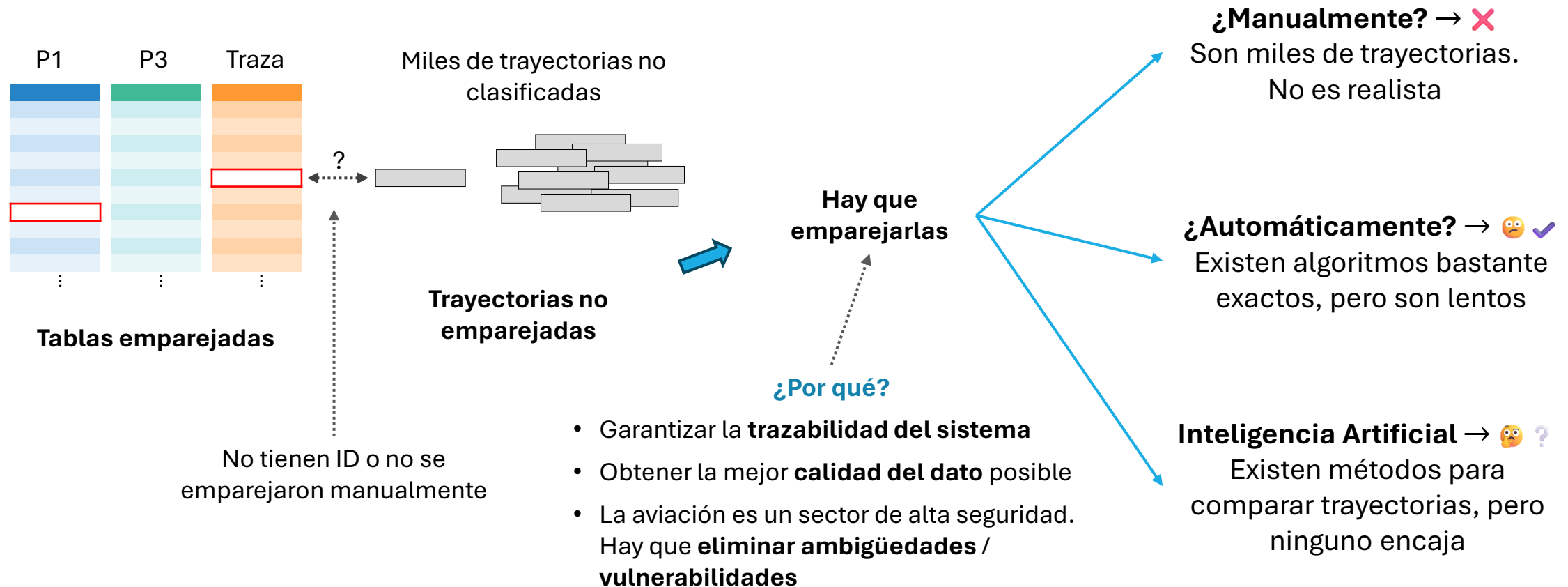
Emparejadas
manualmente con IDs

No tienen ID o no se
emparejaron manualmente

**Trayectorias no
emparejadas**

Introducción

¿Por qué necesitamos medidas de similitud de trayectorias?



Estado del arte

¿Qué medidas de similitud de trayectorias existen?

¿Automáticamente? → 🤔✅

Existen algoritmos bastante exactos, pero son lentos

Medidas
Tradicionales

Para trayectorias generales

Muchas:

- Fréchet (1994)
- DTW (2005)
- EDwP (2015)
- CDDS (2021)

Inteligencia Artificial → 🤖?

Existen métodos para comparar trayectorias, pero ninguno encaja

Medidas
Aprendidas
con
Inteligencia
Artificial

Para trayectorias terrestres
(Coches)

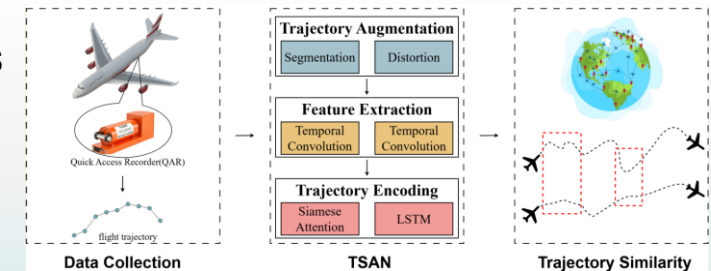
Muchas:

- t2vec (2018)
- T3S (2021)
- TMN (2022)
- TrajCL (2023)
- RSTS (2023)

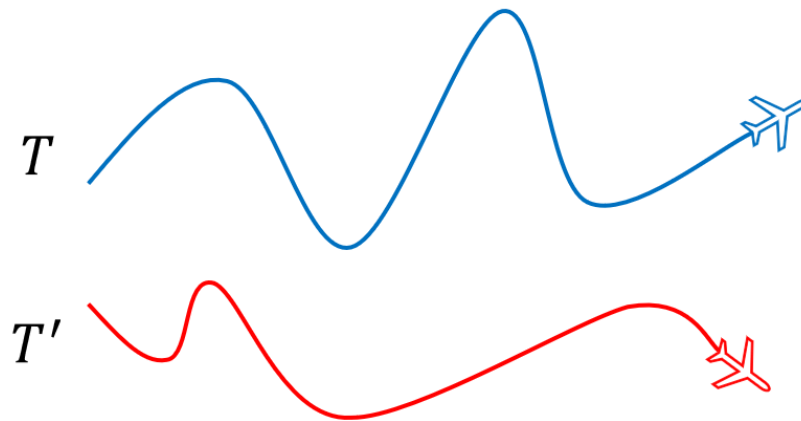
Para trayectorias aéreas

Solo una:

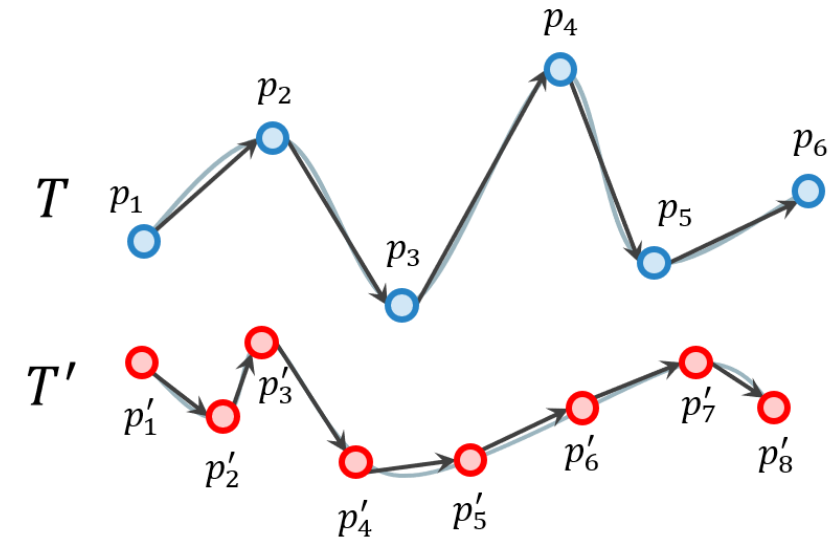
- **TSAN** (Enero 2025)



Datos: Trayectorias



Trayectoria continua

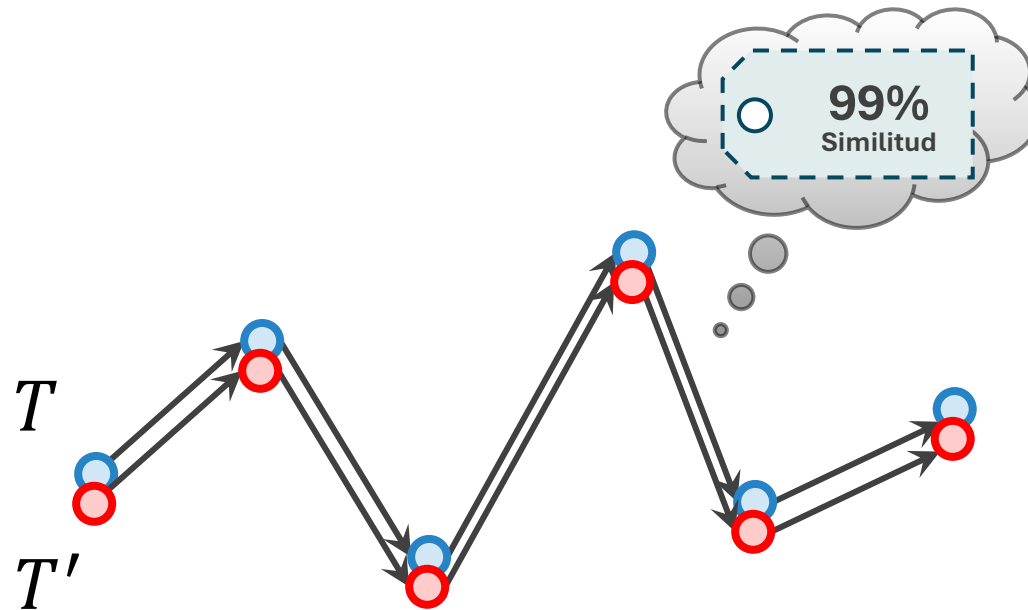


Trayectoria discreta

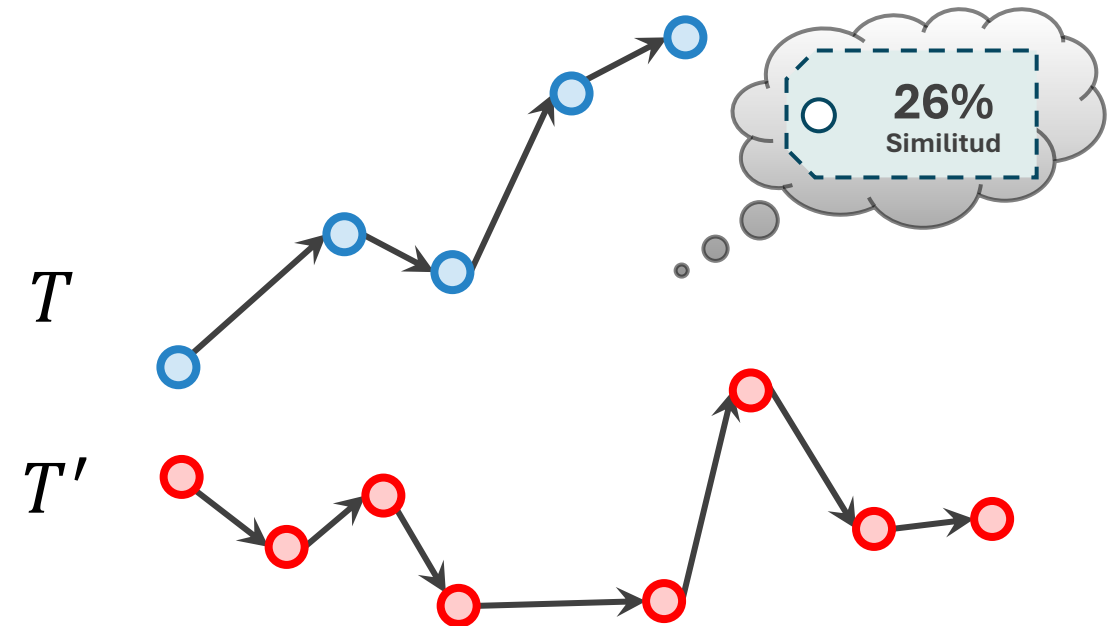
donde cada punto tiene 4 dimensiones:

$$p = [\text{tiempo}, \text{latitud}, \text{longitud}, \text{altitud}]$$

Definición del Problema



Trayectorias similares



Trayectorias distintas

Planes de Vuelo y Trazas

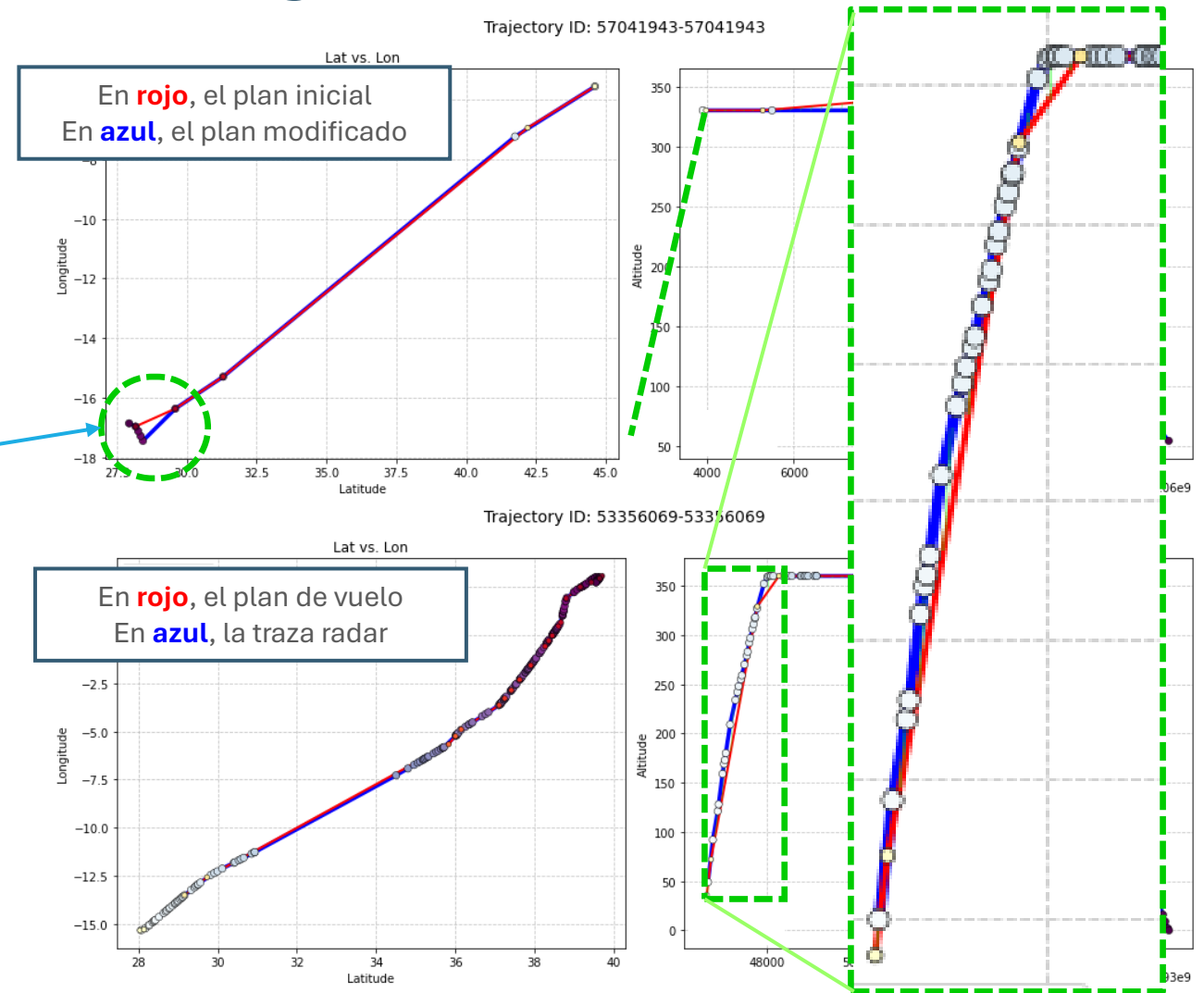
Plan de vuelo → Intención operativa de un vuelo, parcial (arriba) o completa (abajo).

Ruta prevista, puntos de paso, tiempos estimados

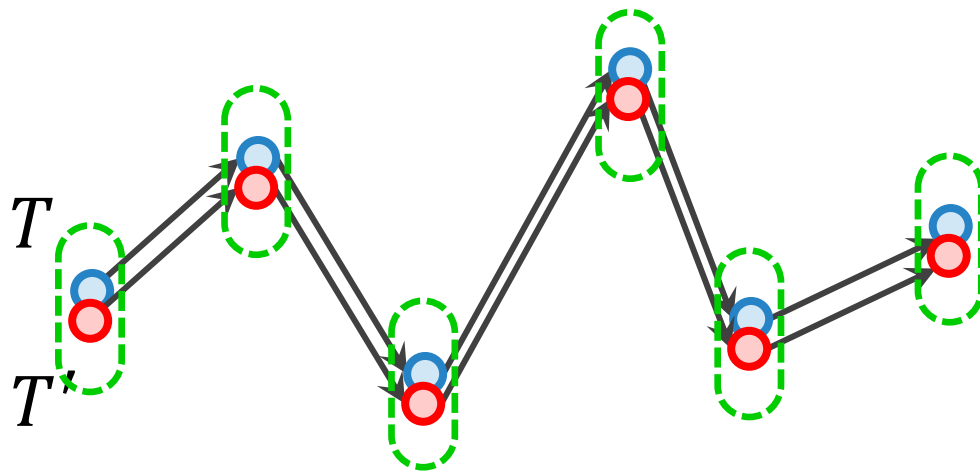
- Inicial → Intención original
- Modificado → Modificaciones aprobadas por el control de tráfico antes del vuelo

Traza radar → ejecución efectiva del vuelo

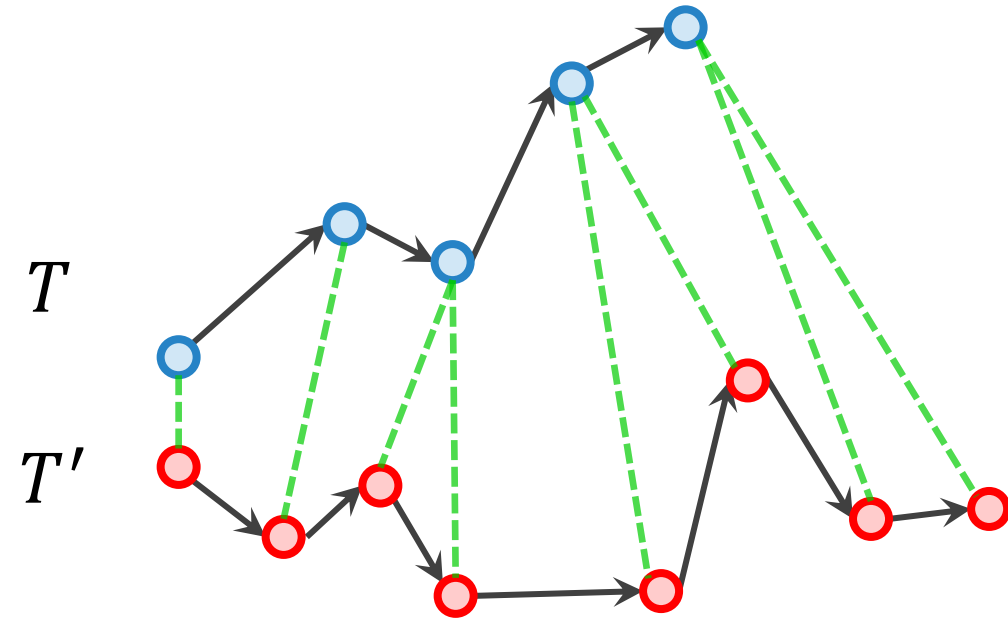
Registra modificaciones por tráfico, decisiones del controlador o condiciones meteorológicas adversas



Métodos tradicionales: Emparejar puntos

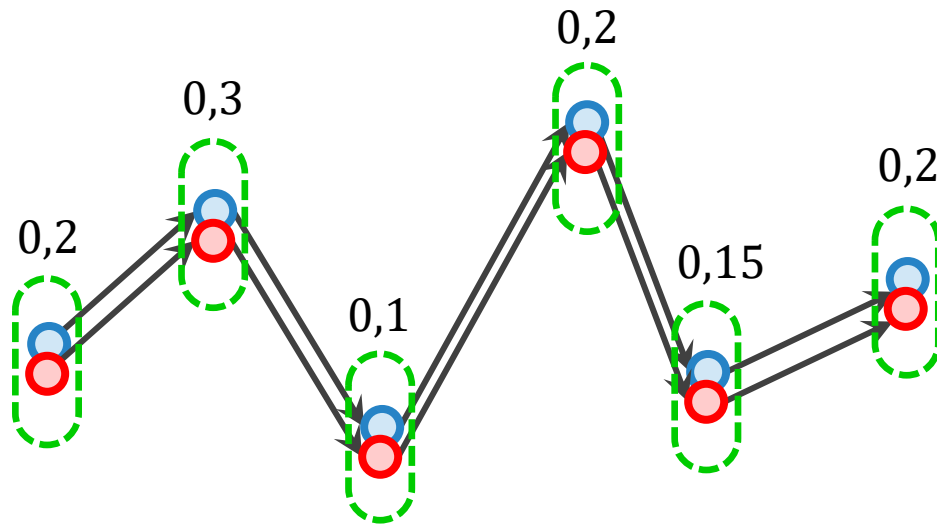


Trayectorias similares



Trayectorias distintas

Métodos tradicionales: Sumar distancias



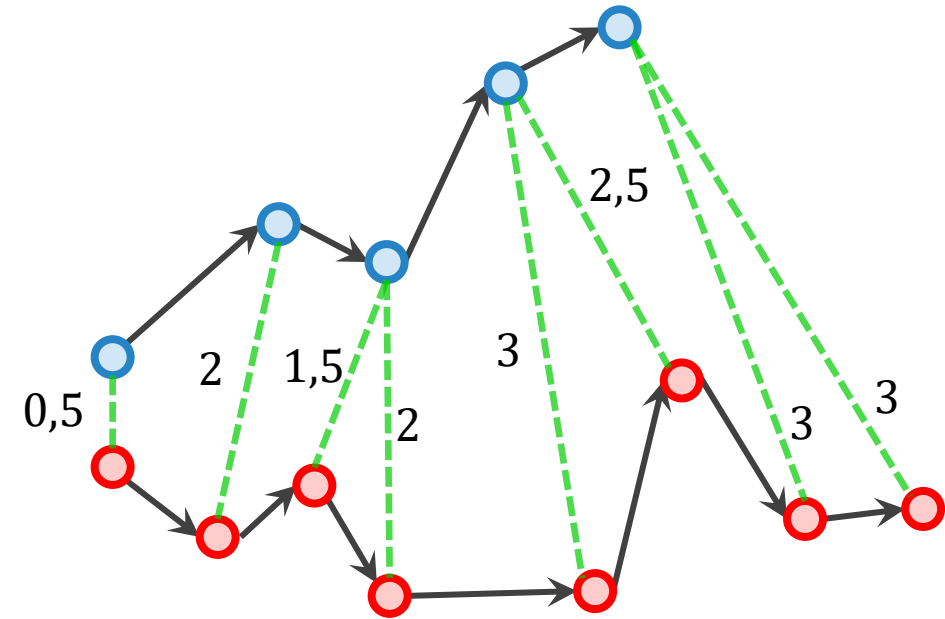
Trayectorias similares

Suma de distancias:

$$0,2 + 0,3 + 0,1 + 0,2 + 0,15 + 0,2 = 1,15 \text{ km}$$

Distancias (km)

¿Unidades de medida?

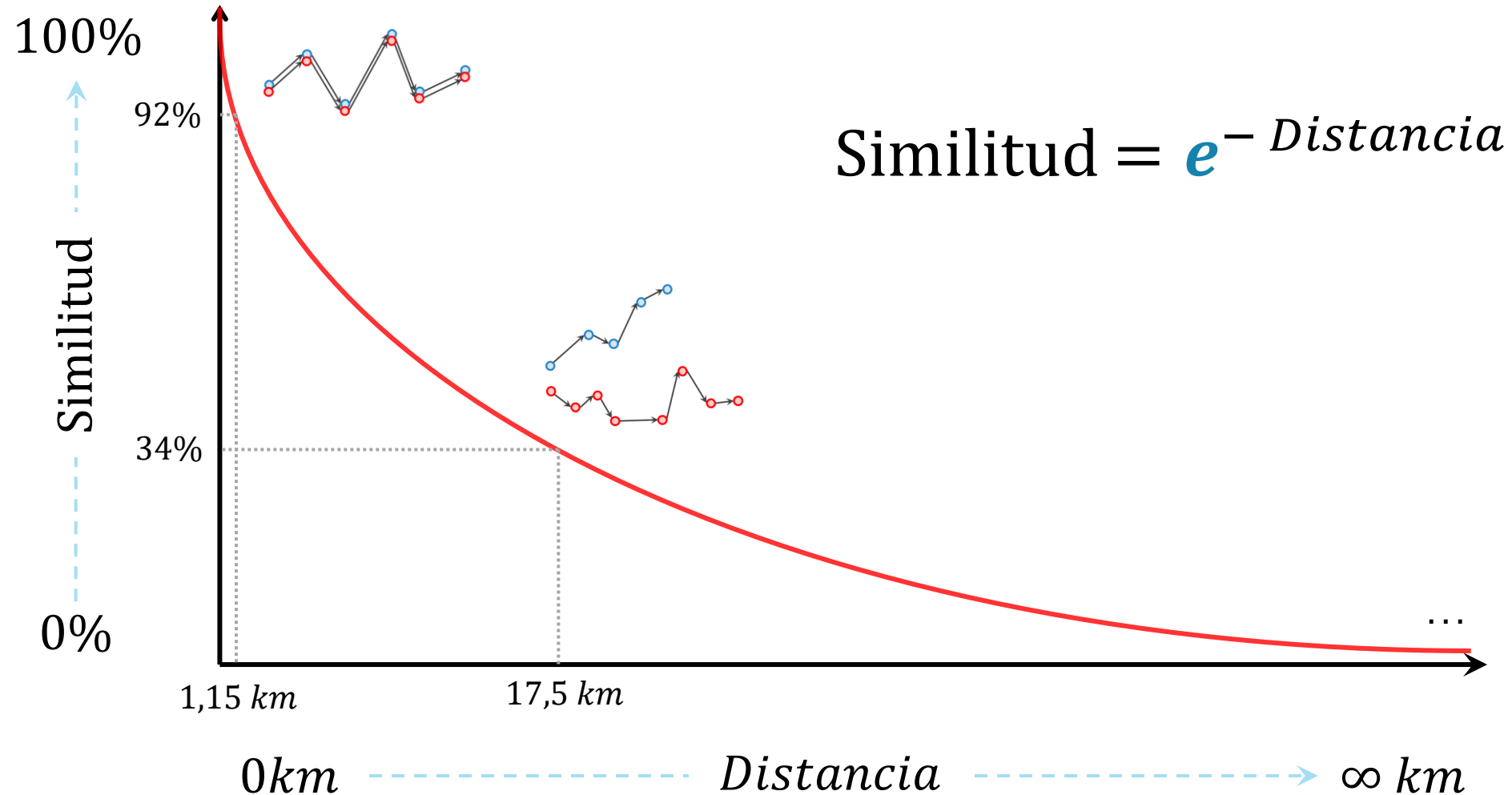


Trayectorias distintas

Suma de distancias:

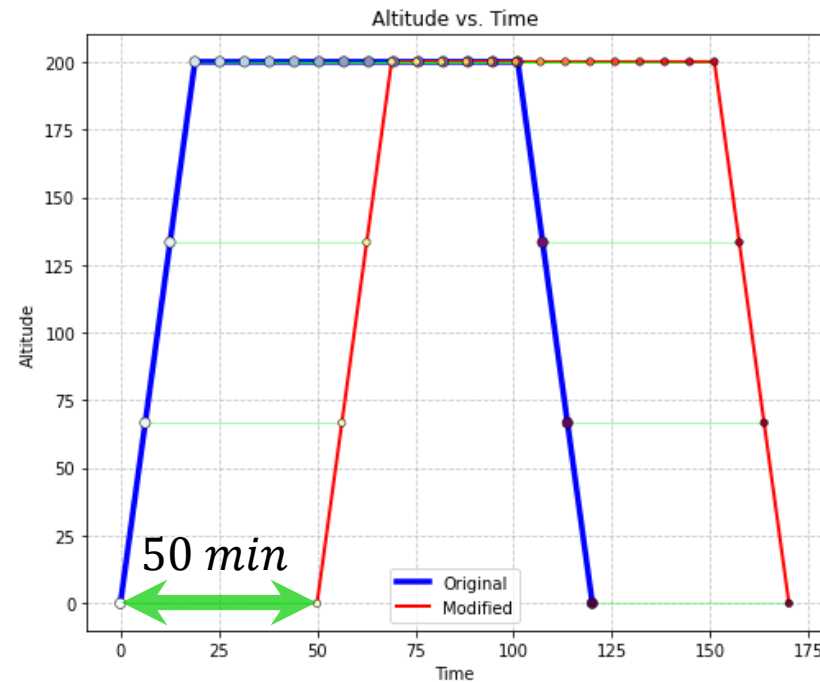
$$0,5 + 2 + 1,5 + 2 + 3 + 2,5 + 3 + 3 = 17,5 \text{ km}$$

De distancia a similitud



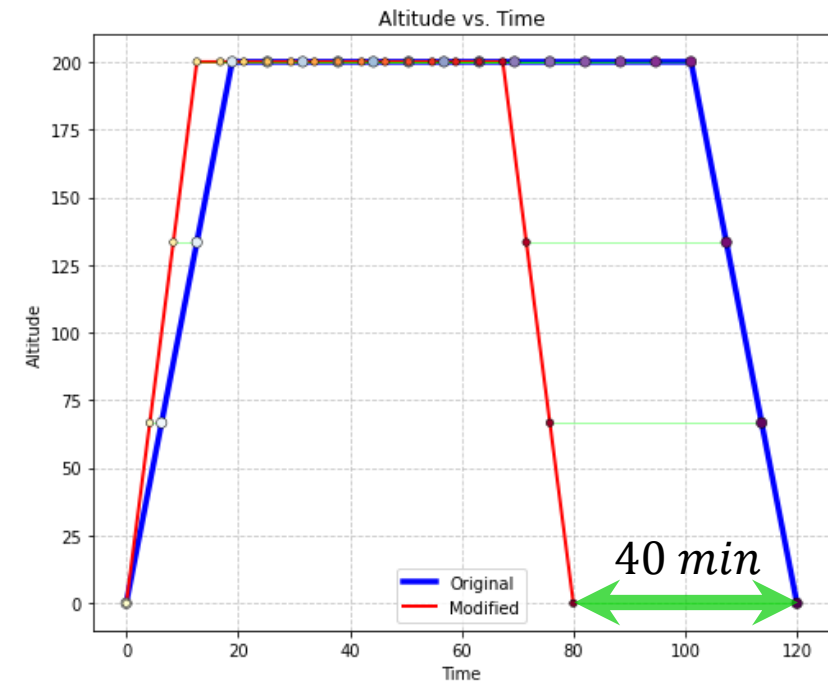
Componente temporal

¿Qué hay que tener en cuenta al medir el tiempo?



Retraso Inicial

Un avión sale antes que el otro

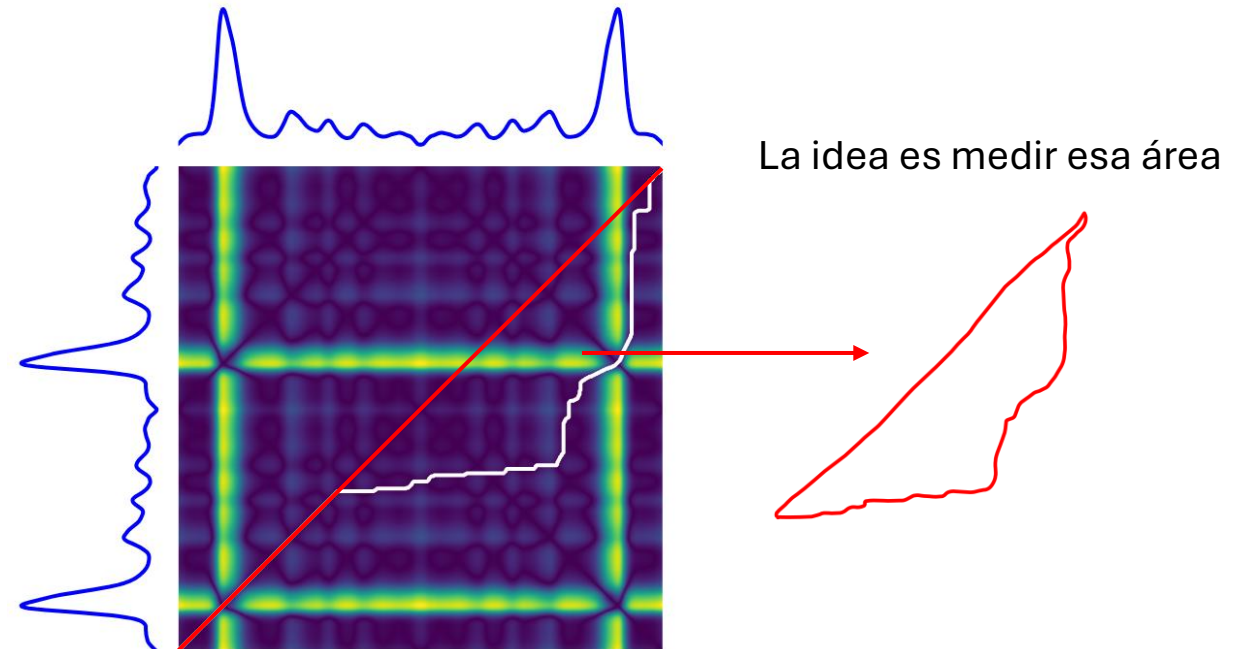
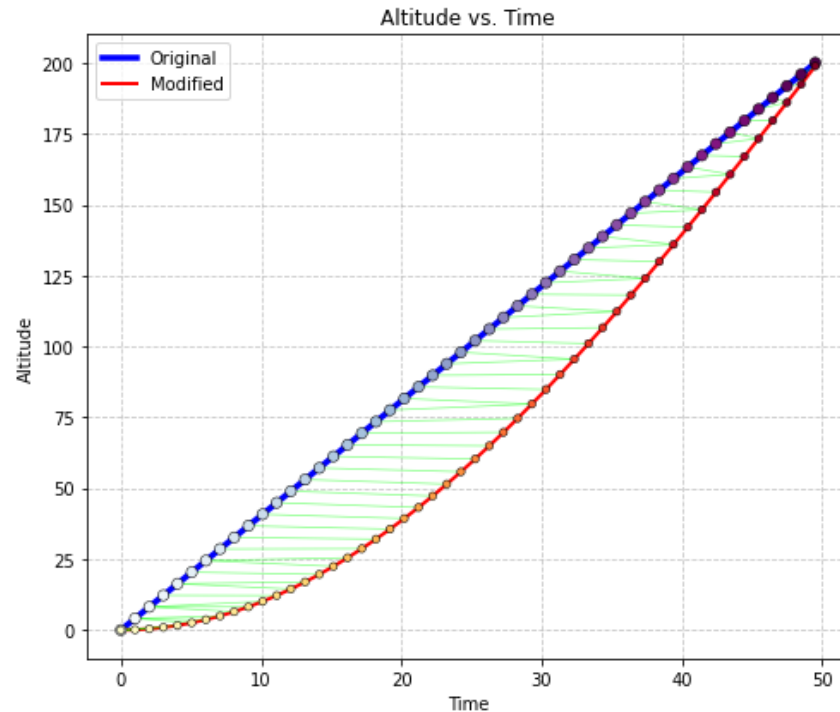


Retraso en trayecto

Un avión hace el trayecto más rápido que el otro

Componente temporal

¿Qué hay que tener en cuenta al medir el tiempo?

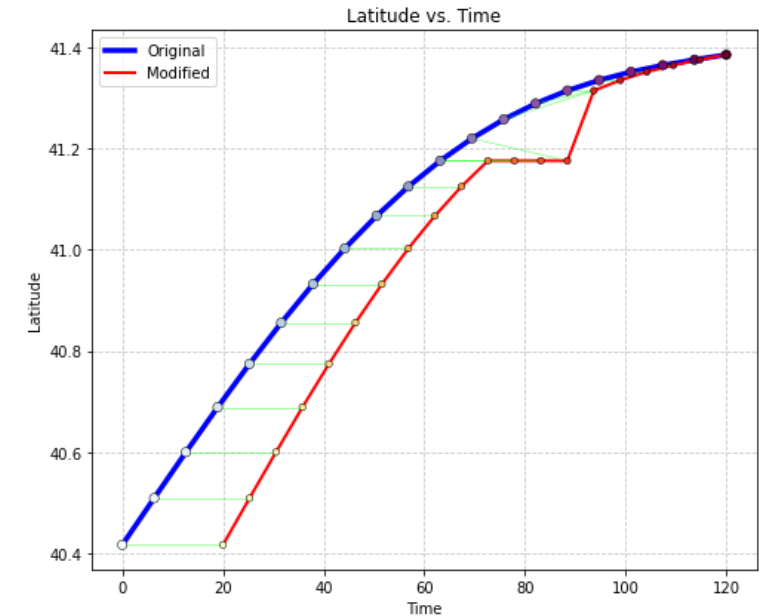
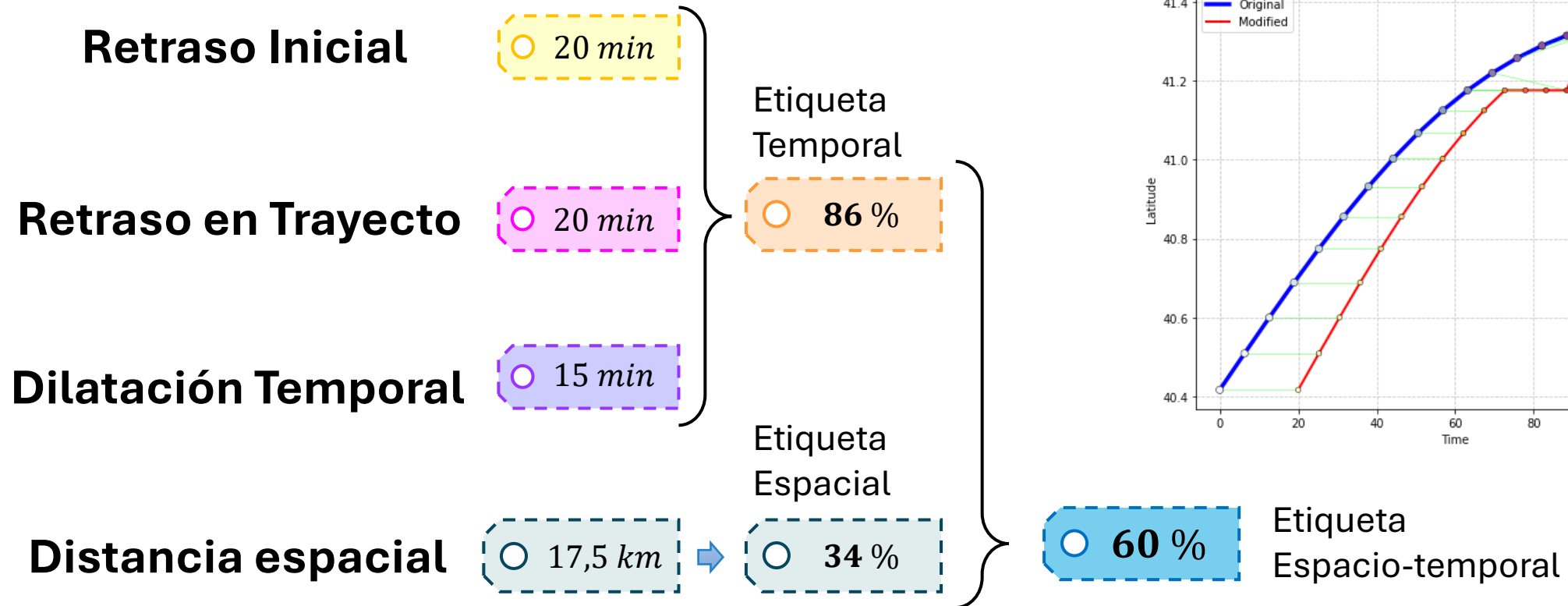


DILATACIÓN TEMPORAL

Compresión o expansión del eje temporal

Etiquetas espacio-temporales

¿Qué hay que tener en cuenta al medir el tiempo?



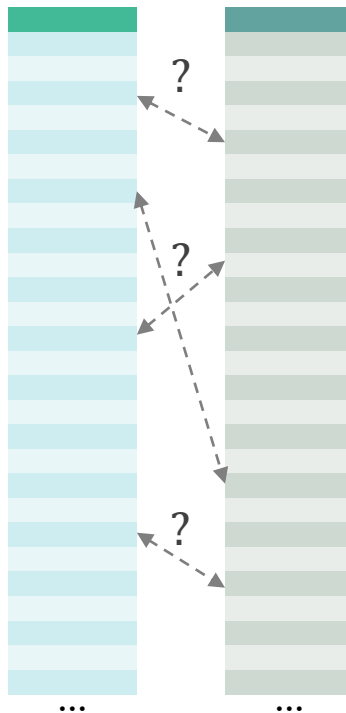
Más interpretabilidad

Menos interpretabilidad

Motivación

Caso de uso:

Emparejar 1000+ trayectorias de 2 listas



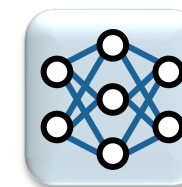
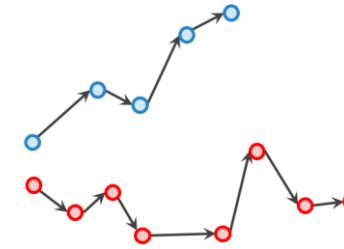
Miles de comparaciones



Propuesta:

Utilizar Redes de Neuronas para aproximar las distancias

$$\rightarrow O(n)$$



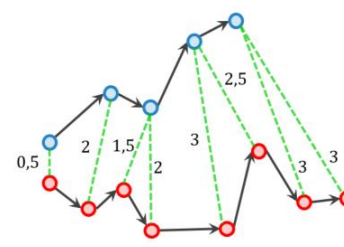
AdherNet



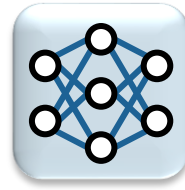
Problema:

Emparejar puntos es muy lento (varias horas)

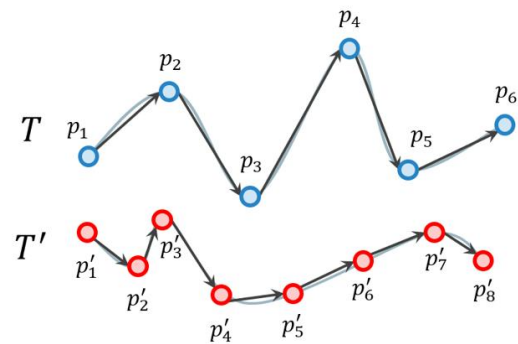
$$\rightarrow O(n^2)$$



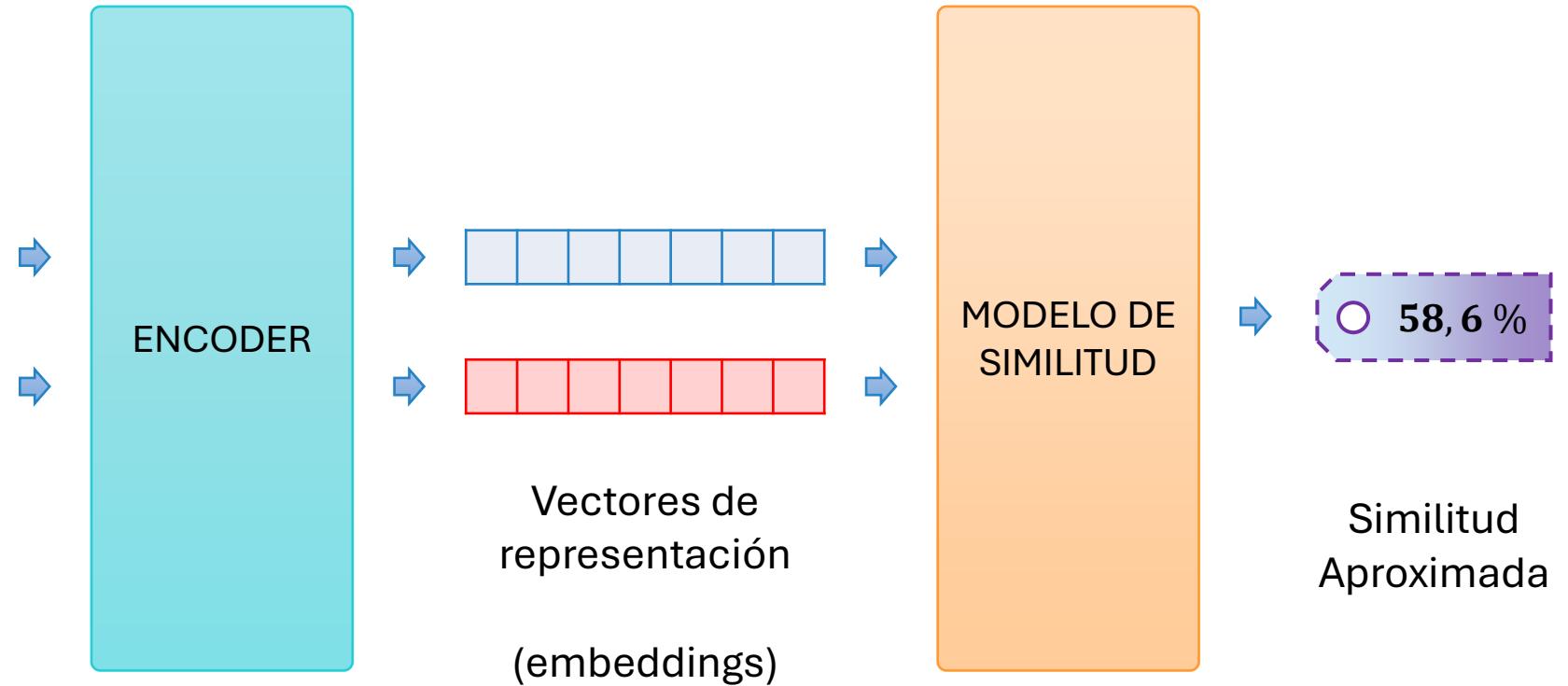
60 %



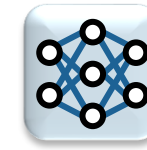
AdherNet



Trayectorias discretas

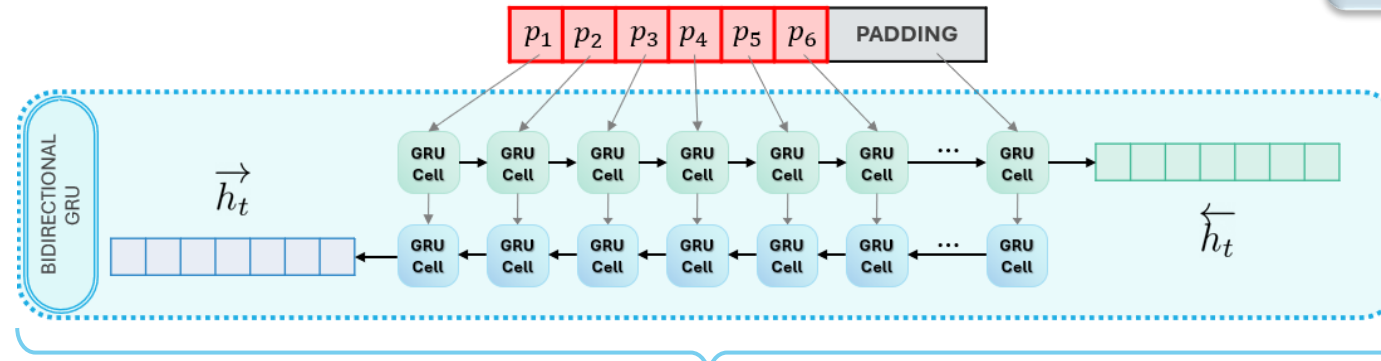


MÓDULO ENCODER



AdherNet

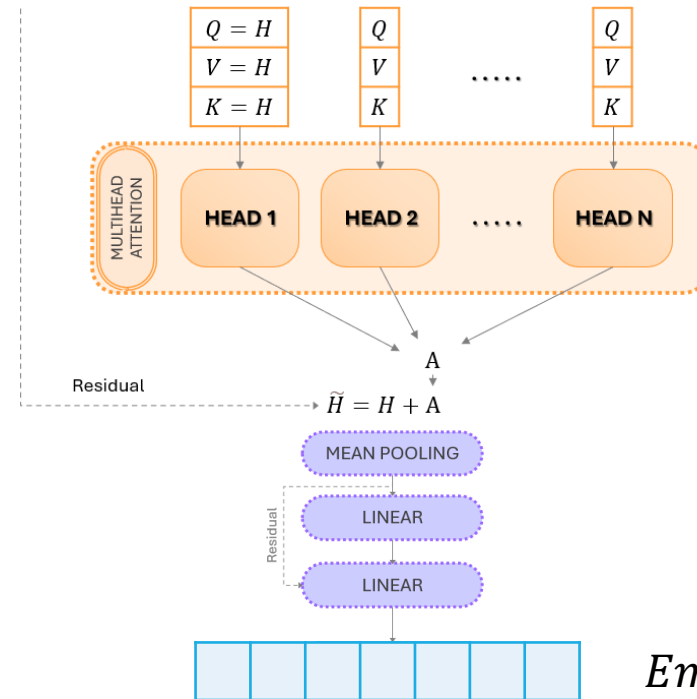
Trayectoria discreta T



$$h_t = [\vec{h}_t \oplus \overleftarrow{h}_t]$$

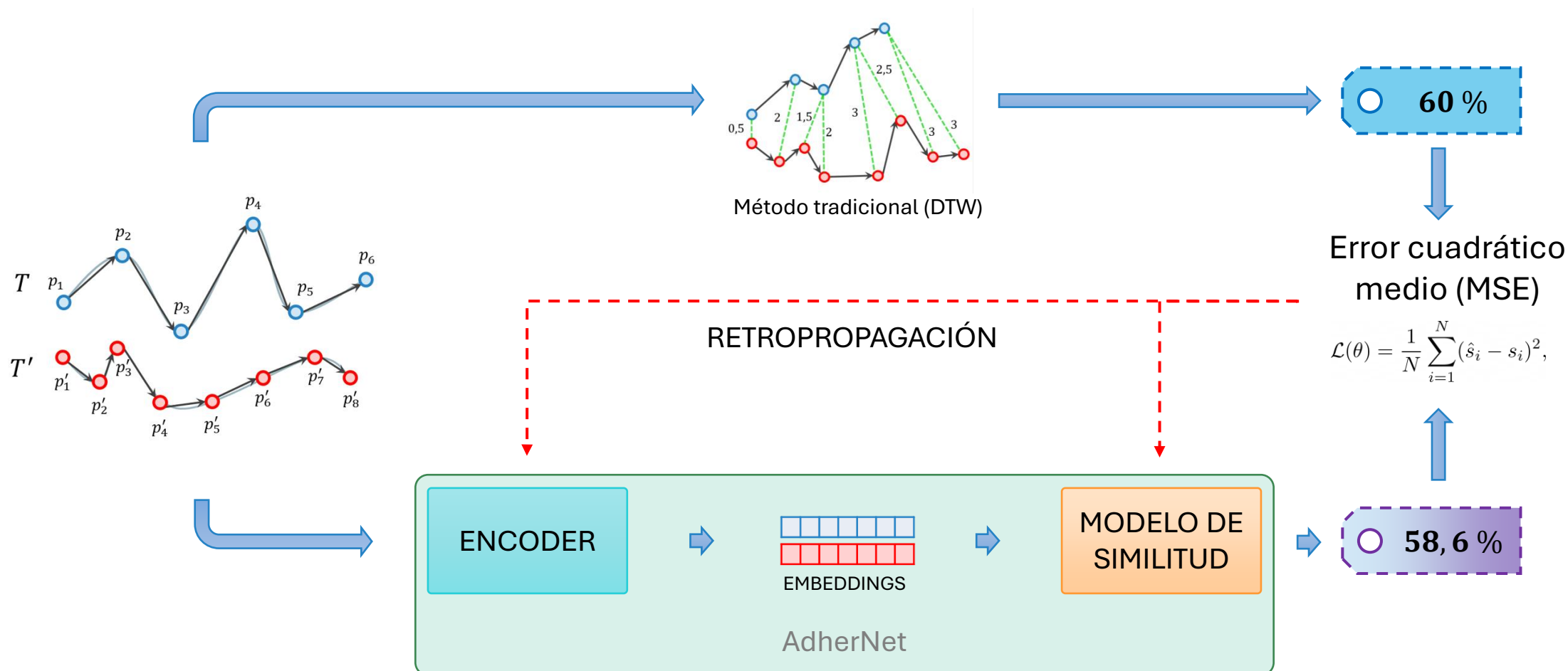
$$H = \{h_1, \dots, h_T\}$$

$$A = \text{MultiHead}(Q = H, K = H, V = H)$$



Embedding e

Entrenamiento



Evaluación del modelo

Datos de entrenamiento:

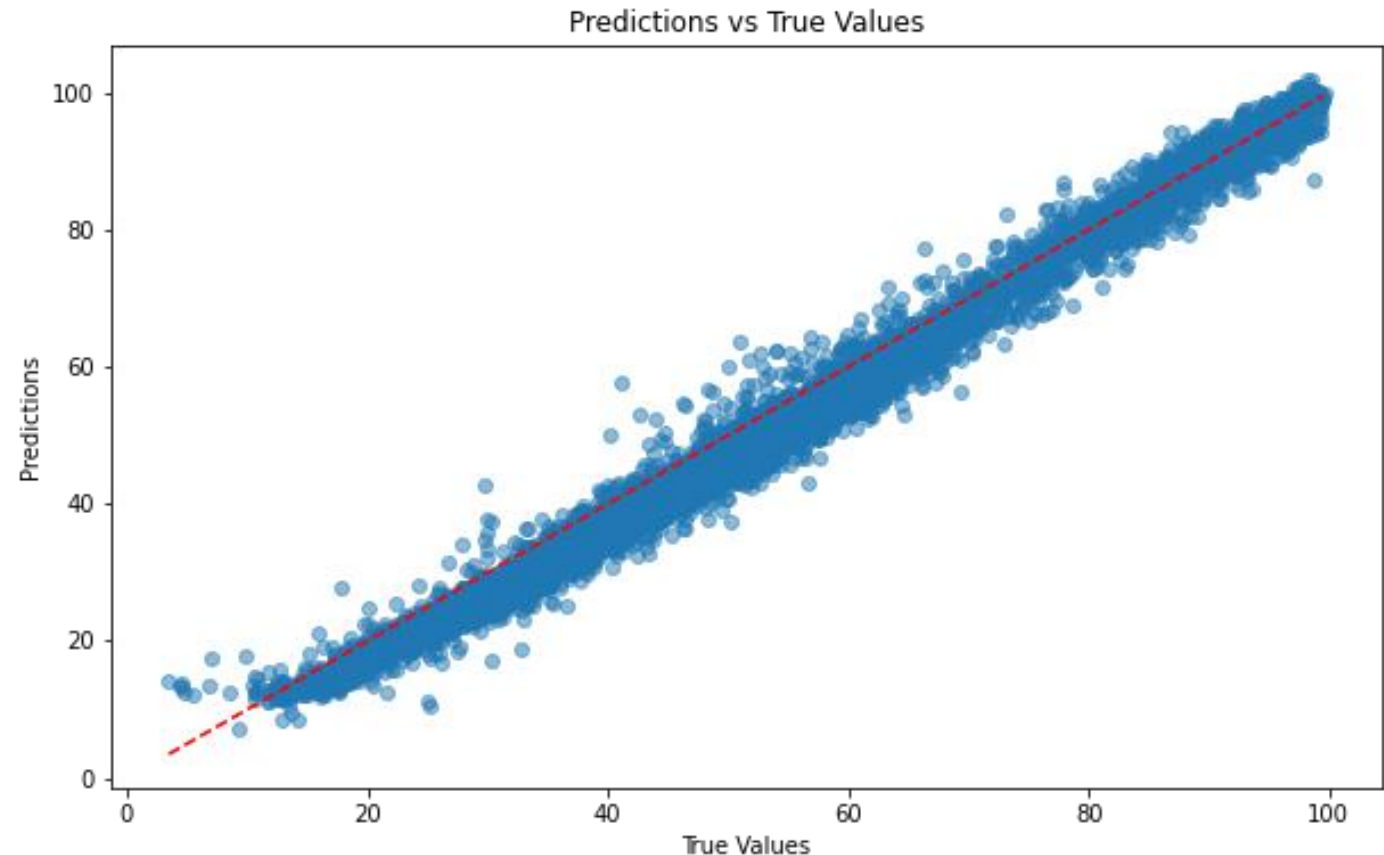
40.000 Pares de trayectorias:

- planes iniciales (tipo 1)
- planes finales (tipo 3)

Resultados de evaluación en

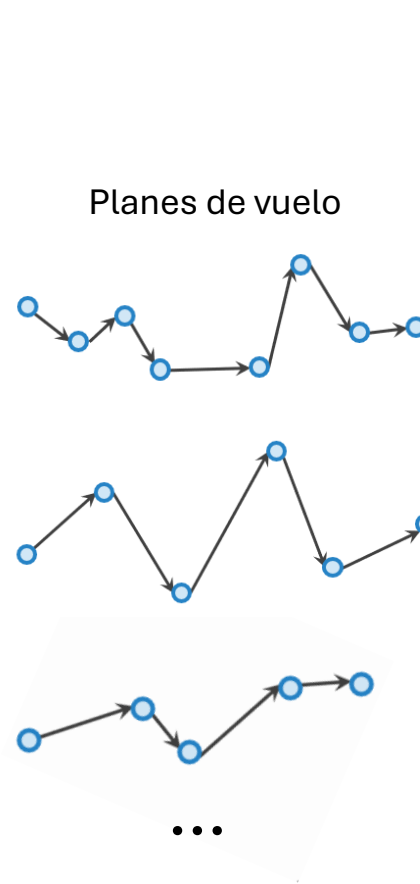
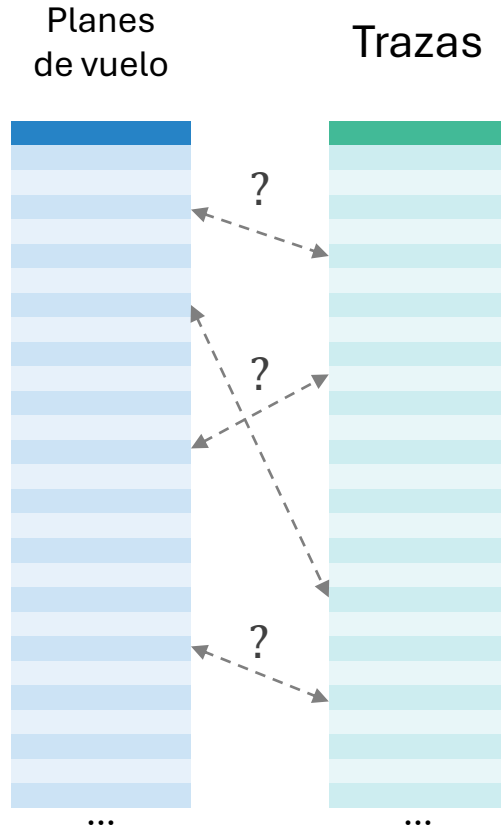
10.000 pares:

- Final test MSE : 11,4397
- Final test R^2 : 0,9796



AdherNet: Búsqueda en listas

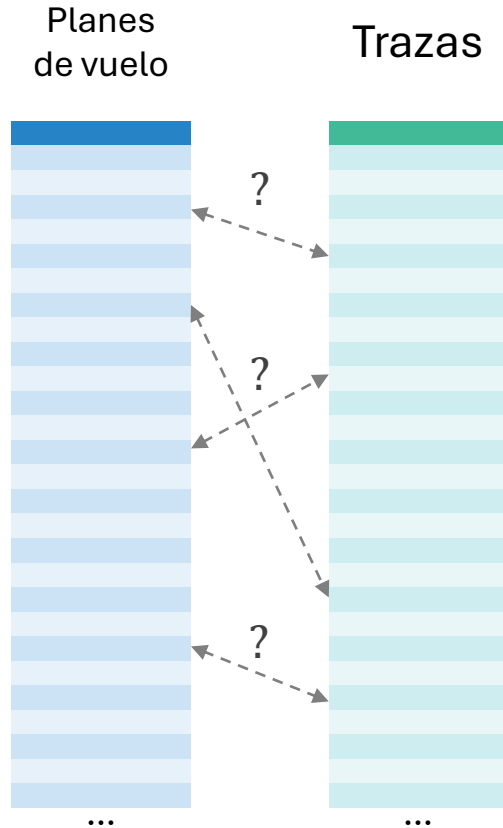
Caso de uso: Emparejar 1000 planes con 1000 trazas



Trazas			
...			
92 %	26 %	56 %	...
26 %	95 %	32 %	...
56 %	32 %	96 %	...
...

AdherNet: Búsqueda en listas

Caso de uso: Emparejar 1000 planes con 1000 trazas

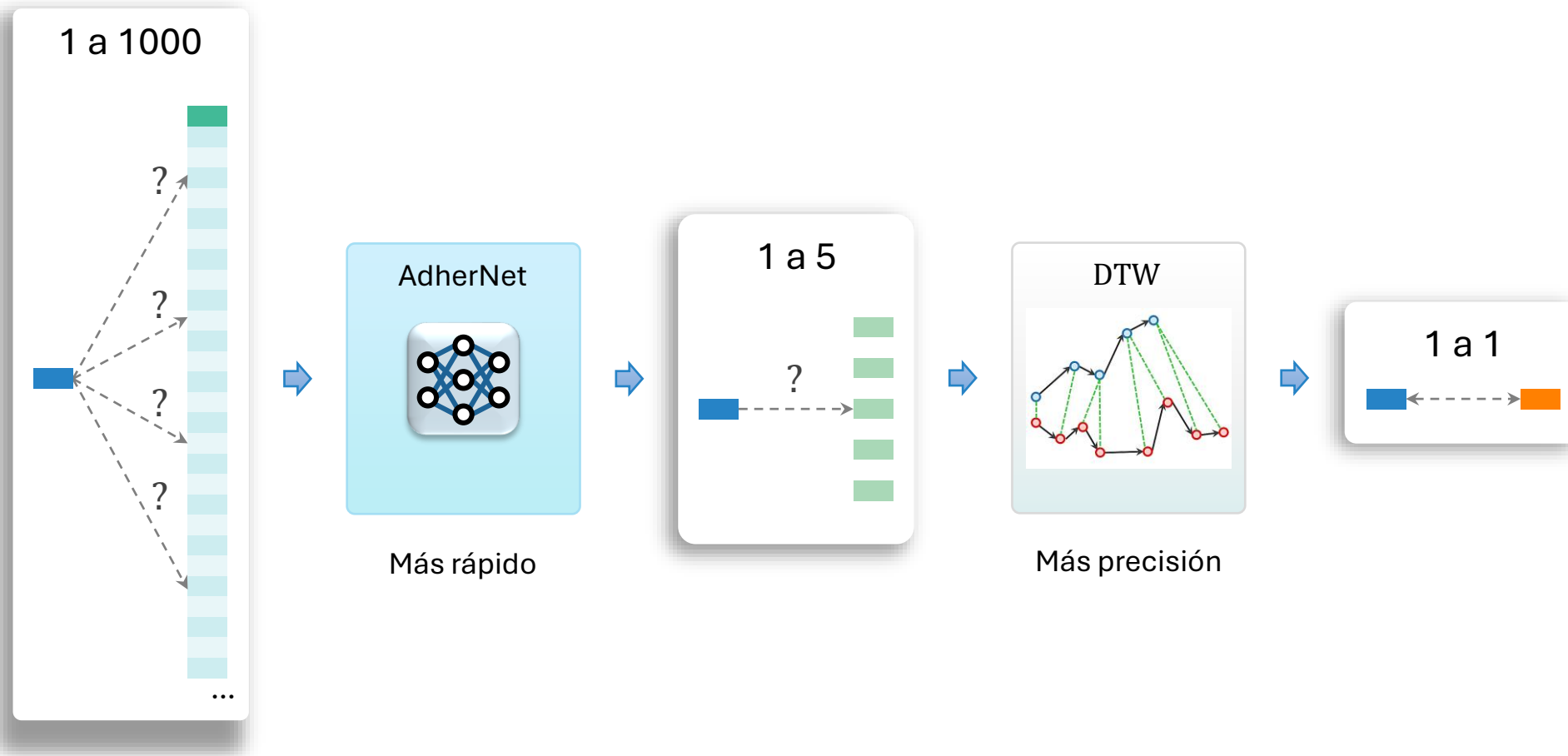


	Emparejando puntos (<i>DTW</i>)	AdherNet
PAREJAS CORRECTAS	98.8 %	95.8 %
Pareja correcta en el top 5 del ranking	100 %	99.8 %
Ranking medio de la pareja correcta	1,092	1,106
Tiempo total	7,06 h	11,40 s
	$O(1000^2)$	$O(1000)$

2000x !!

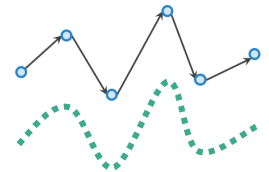
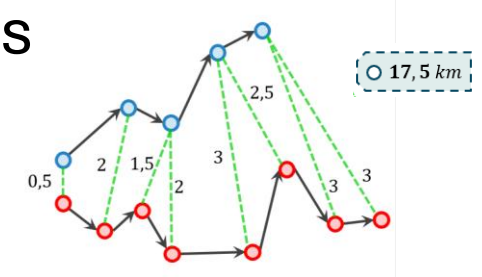
AdherNet: Búsqueda en listas

Caso de uso: Usar AdherNet para reducir espacio de búsqueda



Conclusiones

- Hay múltiples formas de medir la similitud de 2 trayectorias
- Los métodos tradicionales obtienen resultados exactos e interpretables, pero son lentos en volúmenes grandes
- Es posible aproximar medidas de similitud de trayectorias con métodos de **Inteligencia Artificial** con bastante precisión, ahorrando mucho tiempo de computación.
- Las medidas de similitud sirven para **emparejar trayectorias automáticamente**. Otros posibles casos de uso:
 - **Combinar datos:** ver que aerolíneas modifican mas los planes de vuelo
 - **Evaluación de datos sintéticos:** validar modelos de predicción



Gracias por su atención

**Análisis de Coincidencia y Adherencia
de Trayectorias a Plan de Vuelo
utilizando Inteligencia Artificial**



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE INGENIEROS
INFORMÁTICOS