Sistemas caóticos orientados al tráfico vehicular de Bogotá

Introducción a la IA — Aplicaciones de Dinámica No Lineal y Modelado

Nivia Julian

USTA - Ingeniería Electrónica

10 de noviembre de 2025

Agenda

1. Motivación y contexto
2. Recordatorio: caos en pocas ideas
3. Modelos utilizados
4. Caso real: Bogotá
5. Ejercicio para el público
6. Ejemplo en Python
7. Conclusiones
8. Preguntas

¿Por qué hablar de caos en el tráfico de Bogotá?

- Congestión crónica, variabilidad extrema y **fenómenos emergentes**: embotellamientos espontáneos y ondas de parada–arranque.
- Estas dinámicas se explican con **sistemas no lineales** y **caóticos**.
- Entenderlos orienta **estrategias de control**: límites de velocidad variables, ramp metering, coordinación semafórica, priorización TPC.

Tráfico urbano
(múltiples agentes, retrasos, saturación)

→

No linealidad
Retroalimentación
Inestabilidad/caos

De orden a caos: diagrama de bifurcación (mapa logístico)

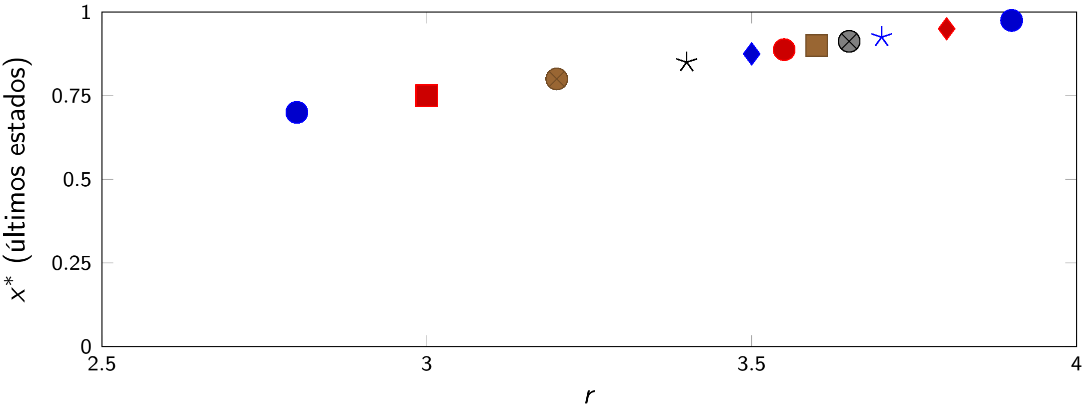


Ilustración: al aumentar r aparecen periodos $2, 4, 8, \ldots$ y luego un régimen caótico (múltiples x^* para un mismo r).

Ideas clave

1. **Sensibilidad a condiciones iniciales**: pequeñas diferencias, trayectorias divergentes.
2. **No linealidad + retroalimentación + retrasos** $\Rightarrow$ comportamientos complejos.
3. **Atractores extraños**, **bifurcaciones** y **transiciones** orden–caos.
4. En tráfico: **ondas de choque**, **inestabilidad de cola**, **jams fantasmas**.

Del mapa logístico al tráfico

Mapa logístico

$$x_{t+1} = r\, x_t\, (1 - x_t),$$

Diagrama de bifurcación: al aumentar r aparecen periodos $2, 4, 8, \dots$ hasta caos.

Analogía con tráfico

- *Car-following*: respuesta no lineal del conductor al espaciamiento y velocidad relativa.
- *Nagel–Schreckenberg*: reglas simples $\Rightarrow$ congestión emergente.

Sistema de tráfico
densidad ρ, velocidad v, flujo $q = \rho v$
retrasos de reacción, límites de capacidad

$\downarrow$

ondas de parada–arranque,
bifurcaciones por densidad crítica

Tres enfoques de modelado (resumen)

Microscópico (car-following)

- IDM (Intelligent Driver Model).
- OVM/FVDM (Optimal/Full Velocity Difference).
- Puede exhibir caos para ciertos parámetros.

Basados en agentes

- Celular automata: Nagel–Schreckenberg.
- Fácil de simular, reproduce jams.

Macroscópico

- LWR/Payne–Whitham: ecuaciones tipo fluidodinámica.
- Permite analizar ondas y estabilidad.

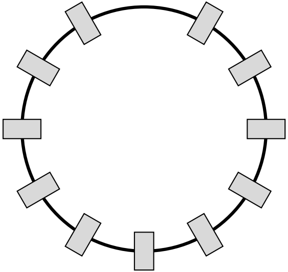
Enlace con IA

- Aprendizaje por refuerzo para control semafórico y ramp metering.
- Redes LSTM/Transformers para predicción de flujo y detección de inestabilidad.

Ejemplo: inestabilidad en un anillo

Experimento conceptual tipo Sugiyama et al. (2008)
Autos en pista circular con velocidad deseada v_0 y distancia objetivo d_0. Retrasos de reacción $\Rightarrow$ se forman **ondas de choque**.

- Densidad baja $\Rightarrow$ flujo estable.
- Densidad media/alta $\Rightarrow$ bifurcación a parada–arranque.
- Métrica: desviación estándar de $v(t)$ crece con la densidad.

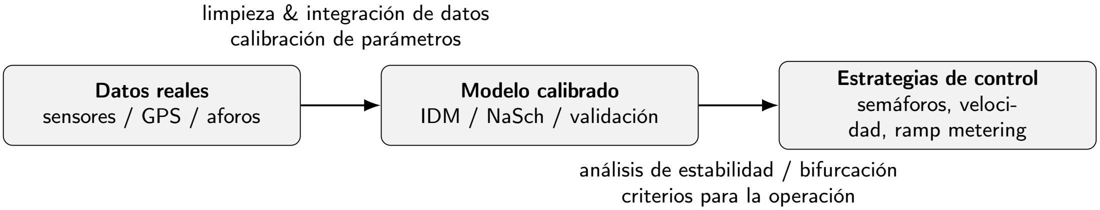


Formación de **ondas** por retraso de reacción

Caso de estudio — Bogotá

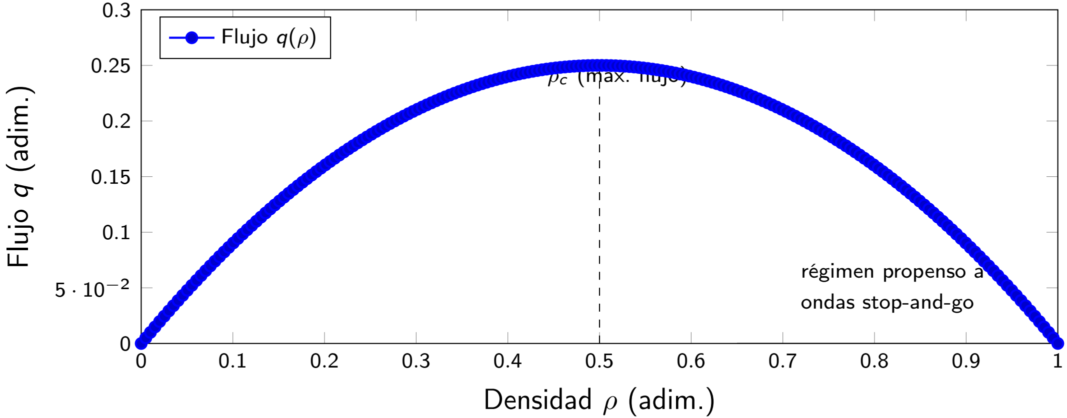
- **Datos** (propuesta): velocidades promedio por corredor, índices de congestión y series de tiempo por hora *[añadir fuente SDM Movilidad / TomTom / INRIX 2024]*.
- **Hipótesis**: existe una **densidad crítica** a partir de la cual emergen ondas de parada–arranque en vías troncales.
- **Metodología**: calibrar IDM/NaSch a un corredor (p. ej. Av. Caracas o NQS) e identificar bifurcaciones vs. densidad/velocidad deseada.
- **Hallazgo esperado**: umbral de inestabilidad y régimen caótico leve en hora pico; recomendaciones de control.

Flujo de trabajo y calibración (Bogotá)



- **Salida:** umbral de densidad ρ_c, métricas q, v y reglas de operación para evitar ondas *stop-and-go*.

Evidencia gráfica (ilustrativa): diagrama fundamental $q(\rho)$



Idea: operar con gestión de velocidad/semaforización para mantener $\rho < \rho_c$ y evitar la inestabilidad.

Ejercicio

Meta: evidenciar sensibilidad a condiciones iniciales.

Considere el **mapa logístico** con $r = 3.9$ y dos condiciones iniciales:

$$x_0 = 0.5000, \qquad y_0 = 0.5001$$

Tarea: calcule (en papel o calculadora) x_1, x_2, x_3 y y_1, y_2, y_3.
Pregunta guía: ¿a partir de qué iteración observan divergencia apreciable?

Pista: $x_{t+1} = 3.9\, x_t(1 - x_t)$.

Discusión del ejercicio

- Pequeños cambios iniciales $\Rightarrow$ trayectorias rápidamente distintas.
- Analogía con tráfico: ligeras variaciones en tiempos de reacción/espaciamientos pueden detonar una onda de parada–arranque.

Solución del ejercicio (mapa logístico, $r = 3.9$)

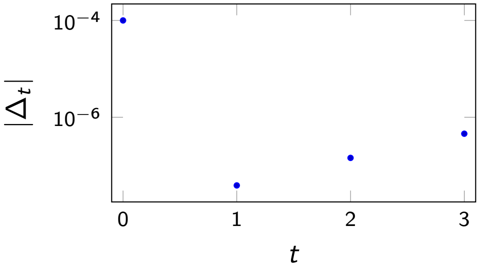
$$x_{t+1} = 3.9\, x_t(1 - x_t), \qquad x_0 = 0.5000, \quad y_0 = 0.5001$$

Iteración	x_t	y_t	$\lvert x_t - y_t \rvert$
$t = 0$	0.500000	0.500100	1.0×10^{-4}
$t = 1$	0.975000	0.974999961	3.9×10^{-8}
$t = 2$	0.095062500	0.095062644	1.44×10^{-7}
$t = 3$	0.335499922	0.335500379	4.56×10^{-7}

Obs.: en $t = 1$ la diferencia disminuye porque $f'(x) = 3.9(1 - 2x)$ y $f'(0.5) \approx 0$; a partir de ahí, la no linealidad hace crecer la separación.

Interpretación: sensibilidad a condiciones iniciales

- Pequeñas variaciones en x_0 pueden *amplificarse* tras pocas iteraciones.
- En tráfico: variaciones mínimas en espaciamiento/tiempo de reacción $\Rightarrow$ ondas *stop-and-go*.
- Moraleja: **controlar el régimen operativo** para evitar entrar en zonas inestables.



Vista logarítmica: la separación reaparece y crece tras $t \geq 2$.

Ejemplo en Python

Ejemplo en Python

en el IDE de Visual Studio Code

Conclusiones

- El tráfico urbano exhibe **dinámica no lineal** y **regímenes caóticos** bajo ciertas condiciones.
- La identificación de **densidades críticas** y **parámetros de estabilidad** permite diseñar políticas de control.
- En Bogotá, combinar **modelos de tráfico** con **IA** es una vía prometedora para mitigar congestión y variabilidad.

Espacio para preguntas

¿Preguntas, comentarios o ideas para aplicar en su localidad?

Referencias clave (recientes y clásicas)

- S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos*, 2nd ed., CRC Press, 2018.
- M. Treiber, A. Kesting, *Traffic Flow Dynamics*, Springer, 2013.
- D. Helbing, "Traffic and related self-driven many-particle systems," *Rev. Mod. Phys.*, 73(4), 2001.
- Y. Sugiyama et al., "Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence," *New J. Phys.*, 10, 2008.
- B. S. Kerner, *The Physics of Traffic*, Springer, 2004.
- X. Li et al., "A review of car-following models and their applications," *Transport Reviews*, 40(3), 2020.
- Z. Zheng et al., "Stability and string stability in car-following models: recent advances," *Physica A*, 597, 2022.
- M. Cools, "Congestion in urban networks: data-driven control," *Annual Reviews in Control*, 52, 2021.
- K. Nagel, M. Schreckenberg, "A cellular automaton model for freeway traffic," *J. Phys. I*, 2(12), 1992.