

Simulación basada en agentes. Modelos



Modelos de simulación

- Vida artificial. Inteligencia colectiva
 - Modelo de Flocking
- Simulación de multitudes
 - Modelo de Fuerza Social
- Infecciones
 - Modelos basados en SIR
- Otros modelos

Flocking. Modelo Boids

REYNOLDS, Craig W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model.

- Conjunto de pájaros discreto, donde el movimiento general parece fluido
- Dispuestos al azar, pero alcanzan sincronización
- Control centralizado intencionado
- Percepción local del mundo

Características básicas

- Flocking
- Evitar obstáculos
- Reaccionar ante depredadores

Modelo Boids

En el modelo de boids se tienen en cuenta tres elementos durante el vuelo, el propio boid, dos o tres vecinos cercanos, y el resto de la bandada.

Aproximación

- Comportamiento representado como reglas en la simulación
- Los actores ejecutan su modelo, y se comunican con sus compañeros mediante el paso de mensajes.
- El estado interno de cada boid debe mantenerse en algún tipo de estructura de datos
- Forman sistemas distribuidos autoorganizados y robustos.

Modelo Boids. Consideraciones

Los boids tienen dos objetivos (deseos)

a. Permanecer más cerca del flock

Protección de los depredadores

Fácil disponibilidad y detección de alimento

b. Evitar colisiones con los compañeros.

Las bandadas no se llenan ni se sobrecargan a medida que se incorporan nuevas aves.

El pájaro individual tiene una percepción localizada y filtrada del resto de la bandada.

Modelo Boids. Reglas básicas

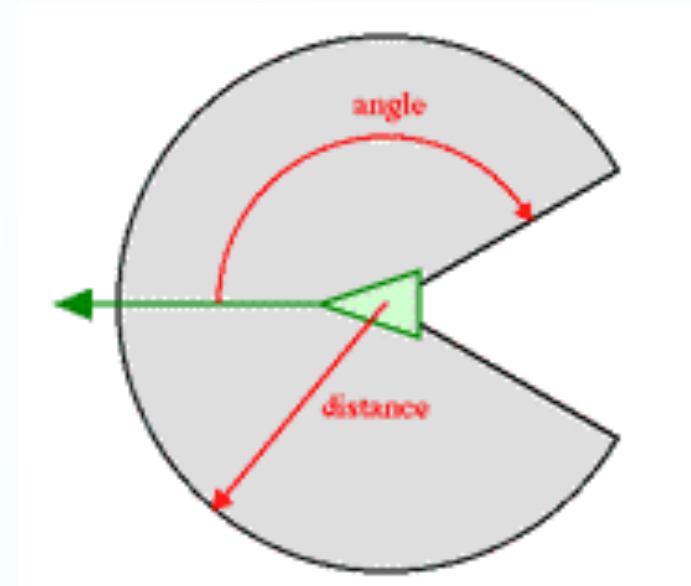
- El flocking está estrechamente relacionado con los **sistemas de partículas**.
- Las fuerzas entre las partículas provocan el movimiento.
- Las interacciones tienen lugar dentro de una vecindad local de cada Boid.
- Hay tres comportamientos básicos de dirección:
 - a) Separación.** Evitar la colisión con otros boids cercanos
 - b) Alineamiento.** Moverse en la misma dirección que los boids vecinos.
 - c) Cohesión.** Moverse hacia el centro promedio de los boids vecinos
- Cada comportamiento de dirección dirige el empuje en una dirección deseada.

Modelo Boids. Reglas básicas

El vecindario suele ser de unos 3-4 pájaros.

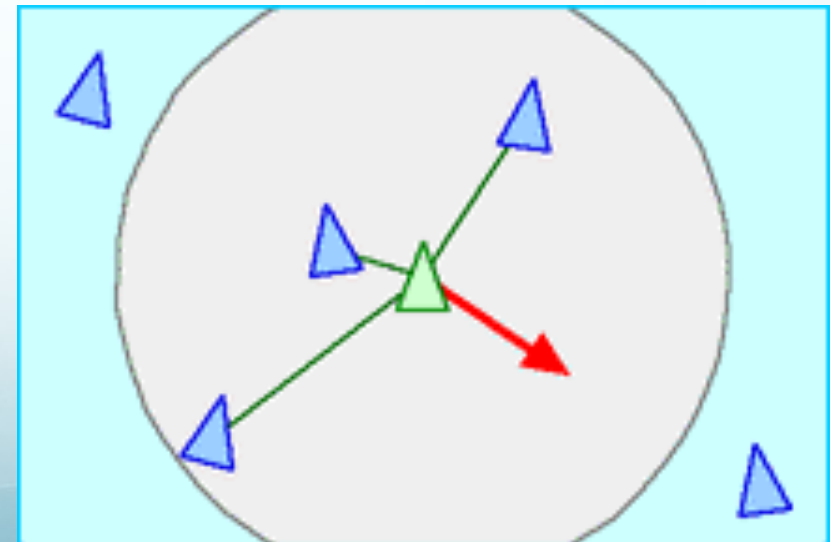
Las métricas son:

- Distancia entre las aves
- Vector de desplazamiento.



Separación

- Los boids se dirigen evitando el apiñamiento de sus compañeros
- Evita la colisión.
- Mantiene a los boids a una distancia realista.

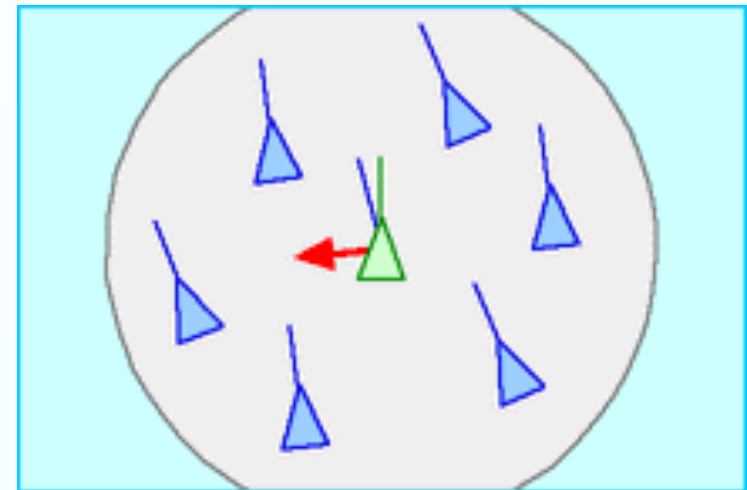


Modelo Boids. Reglas básicas

Alineamiento

Tender hacia la velocidad media de los compañeros de bandada locales

- Los boids intentan igualar la velocidad de sus vecinos
- Complementa la separación
- Hace que los boids se muevan en la misma dirección general

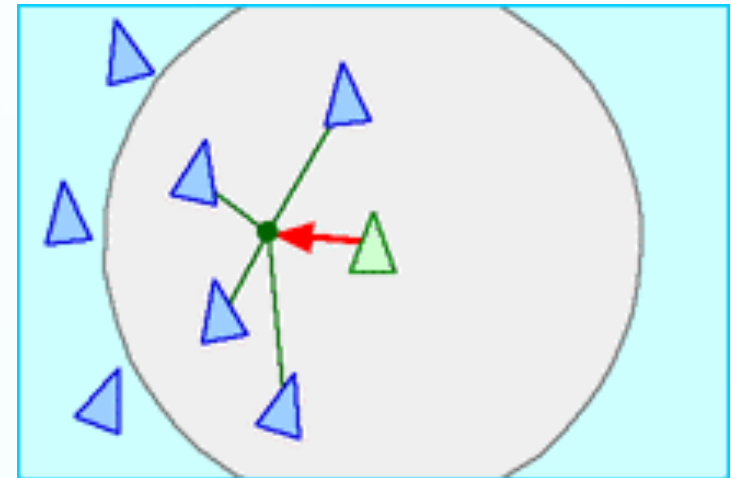


Modelo Boids. Reglas básicas

Cohesión:

Intentar permanecer cerca de los compañeros de rebaño cercanos.

- Los boids se dirigen hacia la posición media de los vecinos
- Hace que los boids se mantengan juntos en un rebaño local.
- Permite que los rebaños se fusionen y se bifurquen



Modelo Boids. Control reglas

- Cada regla de dirección puede producir un vector de empuje diferente.
- El control del Boid debe combinar, priorizar y arbitrar entre los posibles conflictos.
- El promediado (y el promedio ponderado) de los vectores de dirección funciona "bastante bien"
 - puede dar lugar a un comportamiento deficiente si los impulsos de dirección van en direcciones opuestas.
 - la indecisión pueden provocar colisiones con obstáculos.
 - Ejemplo: $(\text{Girar } -90 \text{ grados} + \text{Girar } 90 \text{ grados}) / 2 = 0$.

Modelo Boids. Control reglas

- Una posible solución:
 - Fijar una cantidad de "aceleración" disponible para cada boid en cada iteración de la simulación.
 - Los vectores de dirección se procesan por orden de prioridad
 - Las prioridades pueden reasignarse dinámicamente.
 - Los vectores de dirección se procesan hasta que se agotan los créditos de aceleración.
 - El último vector procesado se atenúa para mantener los límites de crédito de aceleración.

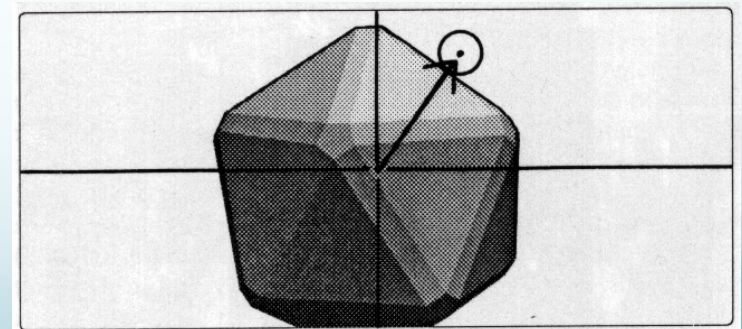
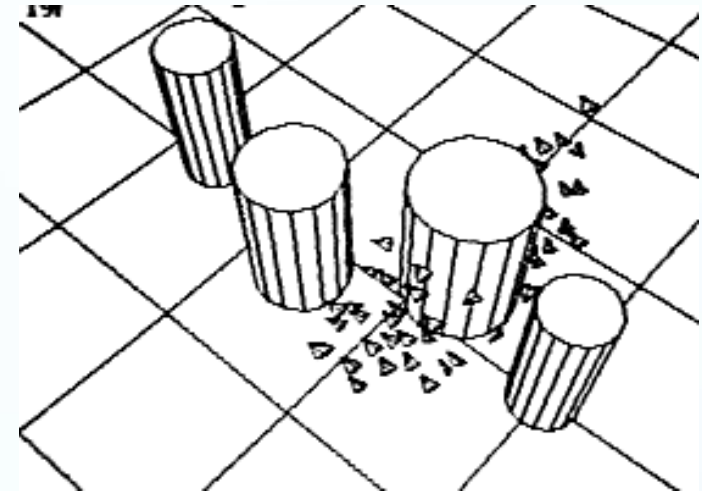
Simulación de Boids

1. Empezar con un modelo de boid que soporte el vuelo geométrico.
2. Añadir comportamientos que correspondan a las fuerzas opuestas de evitación de colisiones e impulso de unirse al bloque.
3. Añadir más comportamientos: evitar obstáculos, protegerse de los depredadores, mas posibilidades de encontrar comida, aparearse, etc.

[Ejemplo en Netlogo](#)

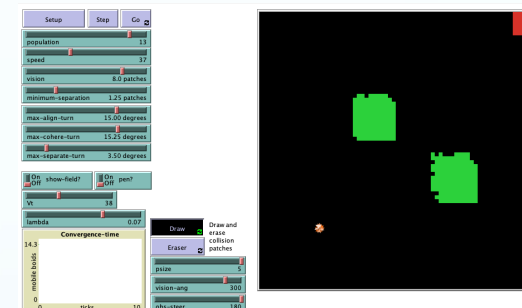
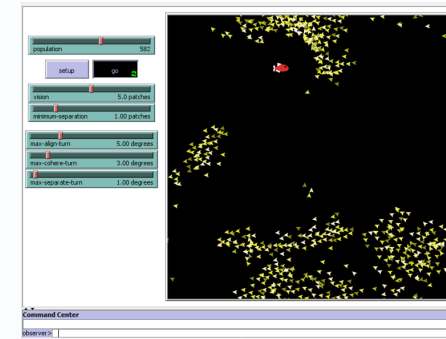
Extensiones. Evitar obstáculos

- Aumento de la complejidad
- Modelo de campo de fuerza.
- Fácil de modelar
- Los obstáculos tienen un campo de repulsión
- *Steer-to-avoid approach*
 - El Boid sólo tiene en cuenta los obstáculos que están directamente delante de él
 - Encuentra el borde de la silueta del obstáculo más cercano al punto de posible impacto
 - Se calcula un vector que dirigirá el boid a un punto situado a una longitud más allá del borde de la silueta

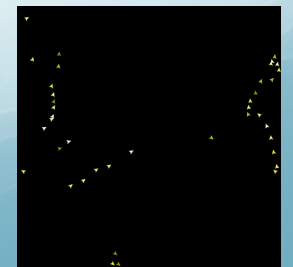


Modelo Boids. Más extensiones

- Depredador
 - Similar a evitar obstáculos
 - [Ejemplo](#)
- Ir hacia objetivo
 - Crear un campo de atracción
 - [Ejemplo](#)
- Formación en v



- Cuando un boid está muy cerca de otro pájaro, se mueve aleatoriamente hacia un lado u otro hasta que su visión ya no está obstruida.
- <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/FlockingVeeFormations>



Modelo Boids. Aplicaciones

El modelo de Boids es un ejemplo fundamental de cómo las reglas simples de interacción local pueden llevar a patrones emergentes complejos en sistemas de múltiples agentes

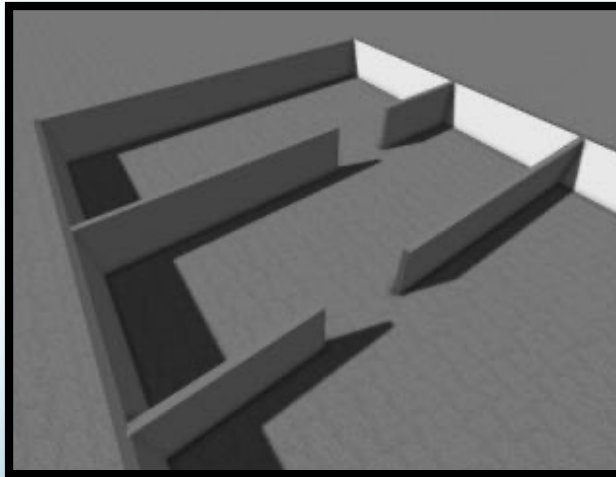
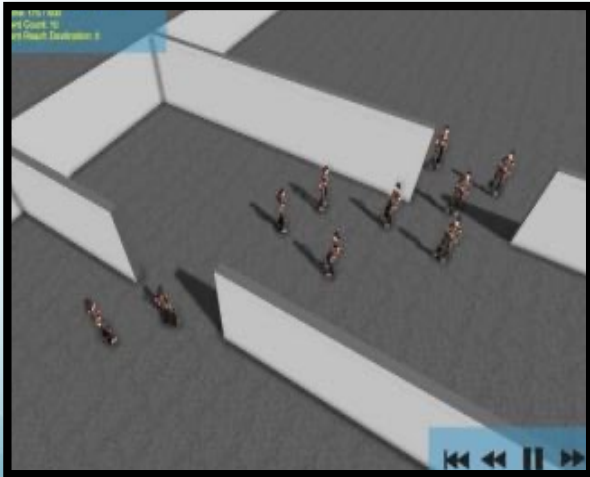
- **Robótica:** tareas que requieren la colaboración de múltiples robots, como la exploración de áreas peligrosas o la realización de búsquedas y rescates en grandes áreas.
- **Diseño de Videojuegos o animación en películas:** El modelo de Boids se utiliza en videojuegos para simular el movimiento realista de grupos de personajes.
- **Simulaciones de Multitudes:** entender y gestionar el movimiento de grandes multitudes: diseño de espacios públicos, estadios, aeropuertos, y evacuaciones de emergencia.
- **Biología y Ecología:** entender mejor el comportamiento colectivo de varias especies animales.
- **Inteligencia Artificial:** desarrollar algoritmos que pueden aprender y adaptarse a partir de reglas simples y la interacción con su entorno.
- **Control de Tráfico y Movilidad Urbana:** entender y optimizar el flujo de vehículos y peatones en entornos urbanos

Modelos de Fuerza Social

- Desarrollado por Dirk Helbing y Peter Molnar en 1995 con varios avances en las últimas décadas.
 - Posteriormente, Illes Farkas y Tamas Vicsek contribuyeron a su desarrollo.
- Reproduce muchas características comunes observadas en el movimiento de los peatones.
- Las fuerzas sociales no son ejercidas por el entorno sobre el cuerpo del peatón, sino que describe la motivación para actuar.
 - Respetar el espacio personal.
 - Seguir a los demás a una distancia segura.
 - Evitar acercarse demasiado a las paredes y a los obstáculos.

Modelo de Fuerza Social

- Puede considerarse un modelo desarrollado de “flocking para peatones humanos”
- Los seres humanos siguen un conjunto de reglas sociales que guían su movimiento.



Modelo de Fuerza Social

- **Ecuaciones Básicas**

1. **Ecuación de Movimiento:**

- Cada peatón i se considera como una partícula con una posición \mathbf{x}_i y una velocidad \mathbf{v}_i .
- La ecuación de movimiento para cada peatón es:
$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i$$
- Aquí, $\frac{d\mathbf{x}_i}{dt}$ representa la derivada de la posición respecto al tiempo, es decir, la velocidad.

2. **Ecuación de Cambio de Velocidad:**

- La velocidad de cada peatón cambia según una ecuación diferencial que representa la suma de fuerzas:
$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_{\text{social}} + \mathbf{f}_{\text{física}}$$
- Donde $\mathbf{f}_{\text{social}}$ representa las fuerzas sociales y $\mathbf{f}_{\text{física}}$ las fuerzas físicas (como el contacto con otros peatones o el entorno).

Modelo de Fuerza Social

- Componentes de las Fuerzas

1. Fuerzas Sociales (f_{social}):

- **Fuerza de Repulsión entre Peatones:** Evita que los peatones se acerquen demasiado entre sí.
- **Fuerza de Atracción hacia Objetivos:** Dirige a los peatones hacia sus destinos (como salidas, puntos de interés).
- Estas fuerzas son a menudo modeladas como funciones que dependen de la distancia entre peatones y/o entre peatones y sus objetivos.

2. Fuerzas Físicas ($f_{\text{física}}$):

- **Fuerza de Contacto:** Cuando los peatones están muy cerca o en contacto, se generan fuerzas físicas que impiden que se penetren mutuamente.
- **Fuerza de Fricción:** En situaciones de contacto, también puede haber fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a la superficie de contacto.

Modelo de Fuerza Social

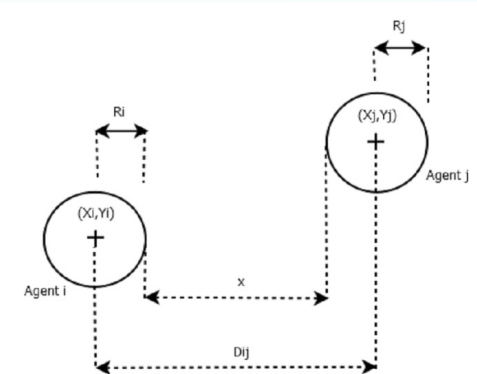
- **Fuerza de Repulsión entre Peatones**

La fuerza de repulsión entre dos peatones i y j se puede modelar como:

$$\mathbf{f}_{\text{rep},ij} = A_i e^{(r_{ij}-d_{ij})/B_i} \mathbf{n}_{ij}$$

donde:

- A_i es una constante que determina la fuerza de la repulsión.
- r_{ij} es la suma de los radios de los peatones i y j , representando la distancia a la que empiezan a interactuar.
- d_{ij} es la distancia real entre los centros de los peatones i y j .
- B_i es una constante que determina el alcance de la fuerza de repulsión.
- \mathbf{n}_{ij} es el vector unitario desde el peatón i al peatón j .



(a) From top view

Modelo de Fuerza Social

- **Fuerza de Atracción hacia Objetivos**

La fuerza que impulsa a un peatón i hacia su destino puede expresarse como:

$$\mathbf{f}_{\text{atr},i} = m_i \frac{(\mathbf{v}_{\text{desired},i} - \mathbf{v}_i)}{\tau_i}$$

donde:

- m_i es la masa del peatón.
- $\mathbf{v}_{\text{desired},i}$ es la velocidad deseada hacia el objetivo.
- \mathbf{v}_i es la velocidad actual del peatón.
- τ_i es un tiempo característico que representa la rapidez con la que el peatón se ajusta a la velocidad deseada.

Modelo de Fuerza Social

- **Fuerza de Contacto y Fricción**

Cuando dos peatones i y j están en contacto físico, la fuerza de contacto y fricción se puede modelar como:

$$\mathbf{f}_{\text{contact},ij} = k(r_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij} + \kappa(r_{ij} - d_{ij})\Delta\mathbf{v}_{ij}^t$$

donde:

- k y κ son constantes que representan la rigidez y la fricción, respectivamente.
- $\Delta\mathbf{v}_{ij}^t$ es la diferencia de velocidad tangencial entre los peatones.

Modelo de Fuerza Social

- Estas fórmulas no son únicas y pueden variar en diferentes implementaciones del modelo.
- La calibración de los parámetros A_i , B_i , k , κ , y τ_i es crucial para obtener un comportamiento realista en las simulaciones.
- Estas fórmulas asumen un modelo simplificado y pueden ser modificadas o extendidas para incorporar comportamientos más complejos o específicos.
- En entornos más complejos, pueden introducirse fuerzas adicionales para modelar efectos como la visión limitada, el comportamiento en grupo, o las reacciones ante situaciones de emergencia.

Modelo de Fuerza Social. Ecuaciones

- La ecuación final de la Fuerza Social quedaría:

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_{\text{social},i} + \mathbf{f}_{\text{física},i} + \mathbf{f}_{\text{fluctuación},i}$$

donde:

- $\frac{d\mathbf{v}_i}{dt}$ es la tasa de cambio de la velocidad del peatón i .
- $\mathbf{f}_{\text{social},i}$ representa las fuerzas sociales actuando sobre el peatón i .
- $\mathbf{f}_{\text{física},i}$ representa las fuerzas físicas, como el contacto y la fricción con otros peatones y objetos.
- $\mathbf{f}_{\text{fluctuación},i}$ es el nuevo término que representa fluctuaciones aleatorias.

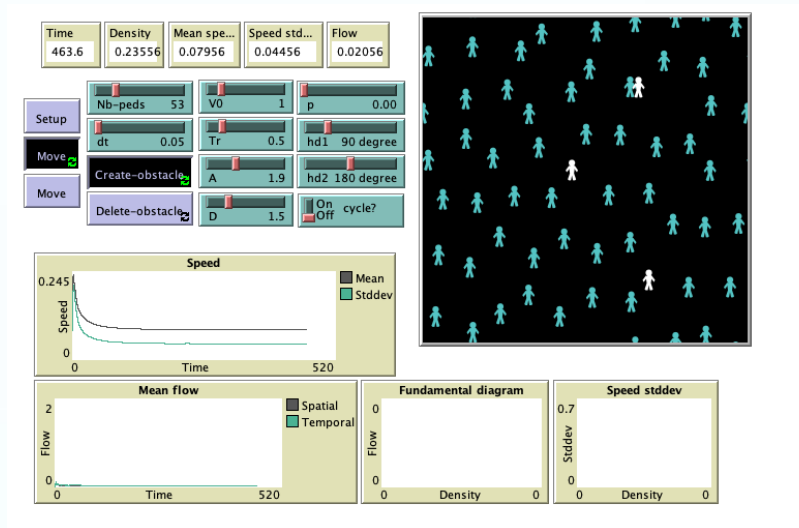
Modelo de Fuerza Social.

Ecuaciones

- El término de fluctuación $f_{fluctuación,i}$ se puede modelar como una fuerza aleatoria que varía con el tiempo, y a menudo se representa como una función estocástica o ruido.
- Un ejemplo común es el uso de un proceso de Wiener o ruido blanco gaussiano, donde la fuerza fluctúa de manera aleatoria con una distribución normal en cada paso de tiempo.
- La inclusión de este término ayuda a capturar la variabilidad y el comportamiento no determinista en las acciones de los individuos
 - relevante en situaciones de alta densidad o estrés, donde los comportamientos pueden ser menos predecibles.

Modelo de Fuerza Social

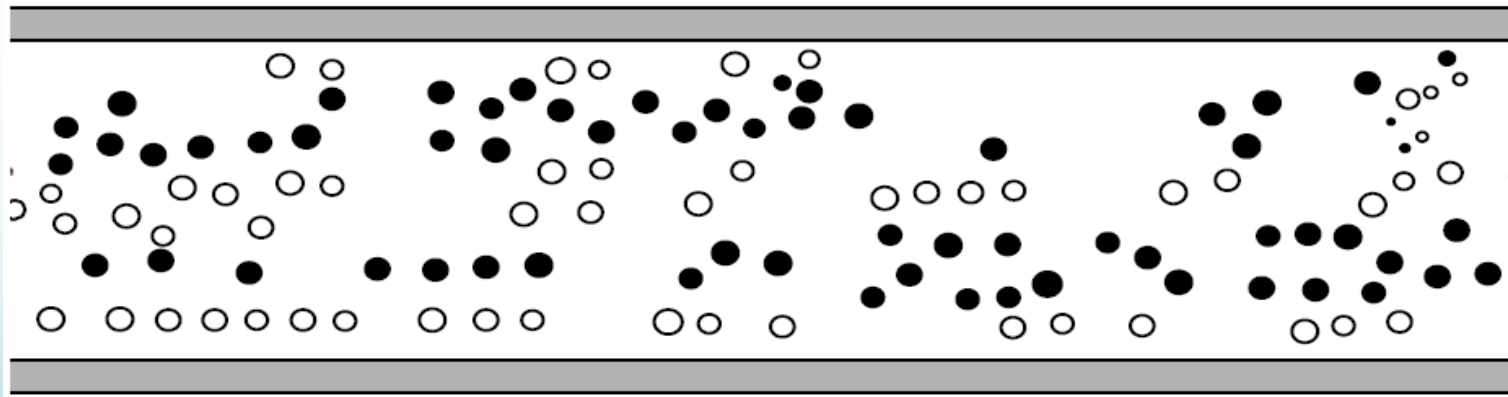
- Ejemplo



- Con estas ecuaciones se observan dos fenómenos peatonales curiosos:
 - Formación de pistas/vías
 - Oscilaciones en puertas

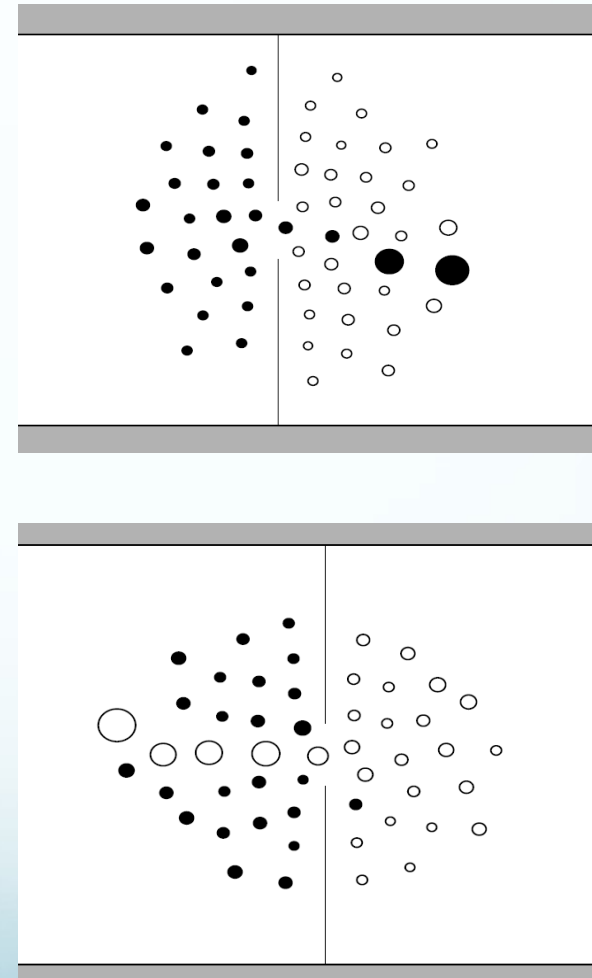
Modelo de Fuerza Social

- Formación de pistas/vías
 - Los círculos vacíos y los círculos llenos tienen la dirección de movimiento deseada en direcciones opuestas.
 - El diámetro del círculo refleja la velocidad real.



Modelo de Fuerza Social

- Oscilaciones en puertas
 - Si un peatón ha podido pasar por una puerta estrecha, otros peatones con el mismo sentido de la marcha pueden seguirle fácilmente. Otros tienen que esperar.
 - La puerta puede ser "capturada" al aumentar la presión en el lado opuesto, permitiendo el paso de los peatones en la otra dirección.
- <https://www.youtube.com/watch?v=1QxSfqS3stw>



Modelo de Fuerza Social. Ext.

- A lo largo de los años se han hecho varias extensiones a las Fuerzas Sociales.
 - Estudiar la dinámica del pánico y la evacuación.
- Características del pánico:
 - La gente se mueve o intenta moverse considerablemente más rápido de lo normal.
 - Los individuos empiezan a empujarse unos a otros (violando las fuerzas de repulsión del trabajo anterior).
 - Los movimientos se vuelven descoordinados.
 - Aparecen atascos en las salidas.
 - Las interacciones físicas en los atascos pueden acumularse hasta llegar a presiones peligrosas, lesionando a las personas y rompiendo los obstáculos.
 - Las personas lesionadas se convierten en obstáculos para el resto de la multitud.
 - La gente muestra una tendencia al comportamiento masivo.
 - Las salidas alternativas suelen pasarse por alto o no se utilizan eficazmente.

Modelo de Fuerza Social.

Aplicaciones

- El modelo de Fuerza Social tiene múltiples aplicaciones, incluyendo:
 - Simulaciones de evacuación en situaciones de emergencia.
 - Planificación y diseño urbano.
 - Gestión y análisis de multitudes en eventos.
 - Estudios sobre el comportamiento humano en situaciones de estrés o pánico.
- La utilidad del modelo consiste en poder entender y predecir el comportamiento de las multitudes.

Modelos epidemiológicos

Más conocidos → Modelos compartimentados

- Se trata de modelos determinísticos a base de sistemas dinámicos.
- Estos modelos se centran en los estados por los cuales pasa el individuo
 - tratando al individuo como parte de un conjunto y no de manera particular.
- Un individuo pasa por diferentes estados en función de unas probabilidades
- El flujo de nuevos infectados está relacionado directamente con las densidades de la poblaciones sana e infectada

Modelos epidemiológicos

Características de los Modelos Epidemiológicos en Simulación Basada en Agentes

1. Agentes:

- Cada agente representa a un individuo en la población.
- Los agentes pueden tener diferentes estados de salud (susceptible, expuesto, infectado, recuperado, etc.).
- Pueden tener características demográficas únicas, como edad, sexo, condiciones preexistentes, que afectan su susceptibilidad y respuesta a la enfermedad.

2. Interacciones y Movilidad:

- Los agentes interactúan entre sí en un entorno simulado, que puede incluir hogares, lugares de trabajo, escuelas, y otros lugares públicos.
- La transmisión de la enfermedad ocurre durante las interacciones entre agentes susceptibles e infectados.

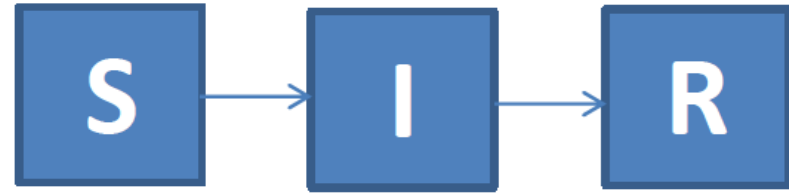
3. Reglas de Comportamiento:

- Los agentes siguen reglas que pueden incluir movimientos diarios, comportamientos de búsqueda de atención médica y acatamiento de medidas de salud pública (como el uso de máscaras y el distanciamiento social).

4. Dinámicas Temporales:

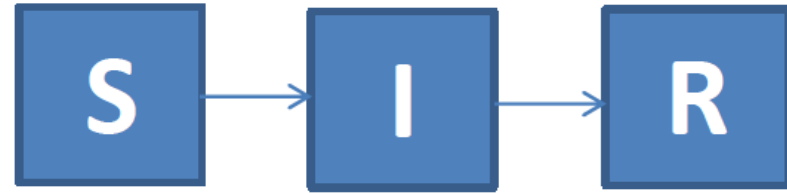
- La simulación progresa en pasos temporales, permitiendo observar cómo evoluciona la epidemia a lo largo del tiempo.

Modelo SIR



- Este modelo considera sólo tres clases de individuos: *susceptibles, infectados y recuperados*
- $S(t)$ representa a los individuos susceptibles, aquellos que no han sido infectados y que podrían resultar infectados.
- $I(t)$ representa a los individuos infectados y que pueden transmitir la enfermedad.
- $R(t)$ representa a los individuos recuperados que han pasado la infección y crean inmunidad.

Modelo SIR



- El modelo se describe según las ecuaciones:

- Susceptibles:**

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N}$$

- Infectados:**

$$\frac{dI}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \gamma I$$

- Recuperados:**

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI$$

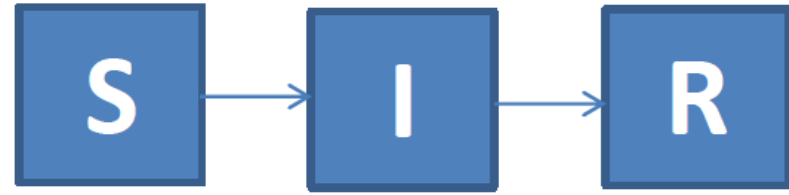
$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

donde:

- S, I, R son el número de susceptibles, infectados y recuperados, respectivamente.
- N es la población total ($N = S + I + R$).
- β es la tasa de contacto efectivo, que representa la probabilidad de transmisión de la enfermedad entre un susceptible y un infectado.
- γ es la tasa de recuperación, que es la fracción de infectados que se recuperan por unidad de tiempo.

Modelo SIR



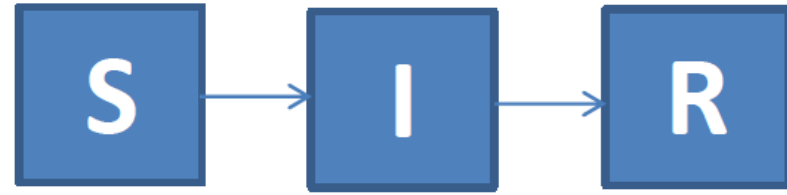
- **Aplicaciones:**

- El modelo SIR se utiliza para entender la dinámica de diferentes enfermedades infecciosas y para evaluar el impacto de intervenciones como la vacunación y el distanciamiento social.
- Ayuda a estimar números importantes como el número básico de reproducción (R_0), que indica cuántas personas, en promedio, infectará cada caso en una población completamente susceptible.

- **Limitaciones:**

- El modelo asume una mezcla homogénea de la población, lo que significa que cada individuo tiene la misma probabilidad de entrar en contacto con cualquier otro individuo, lo cual no siempre es realista.
- No tiene en cuenta factores como la estructura de edad de la población, movimientos espaciales, o diferencias en la inmunidad.

Modelo SIRext



- Este modelo se considera que los individuos pueden nacer y morir.
- El modelo se describe según las ecuaciones:

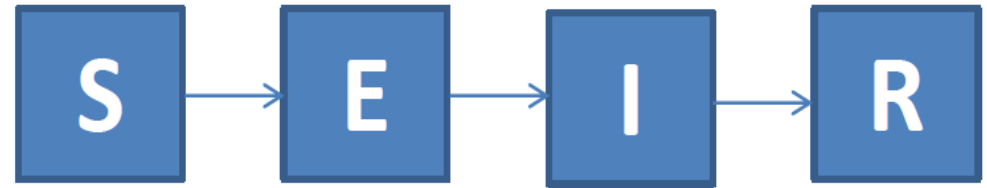
$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI + \mu(N - S)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I - \mu I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R$$

donde N es la población total ($N = S + I + R$), β la tasa de infección, μ la tasa de promedio de nacimientos y defunciones por causas naturales (consideradas iguales) y γ es la tasa de curación.

Modelo SEIR



- Este modelo incluye una nueva clase de individuo.
- La clase de expuesto (E, del inglés *exposed*).
 - el individuo porta la enfermedad pero se halla en un periodo de incubación en la cual no presenta síntomas y no está en condición de infectar.

El modelo se describe según las ecuaciones:

donde B es el número de nacimientos por unidad de tiempo, β la tasa de infección, μ la tasa de promedio de defunciones por causas naturales, ϵ tasa de incubación y γ es el tiempo promedio de infección.

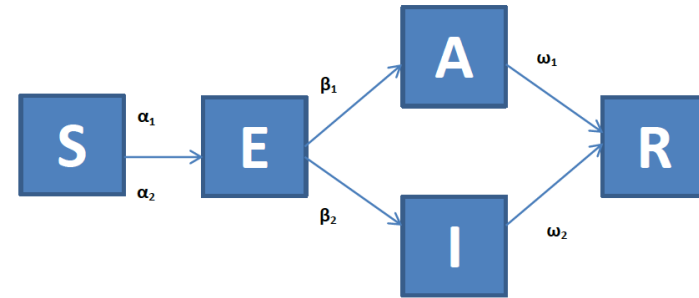
$$\frac{dS}{dt} = B - \beta SI + \mu S$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta IS - (\epsilon + \mu)E$$

$$\frac{dI}{dt} = \epsilon E - (\gamma + \mu)I$$

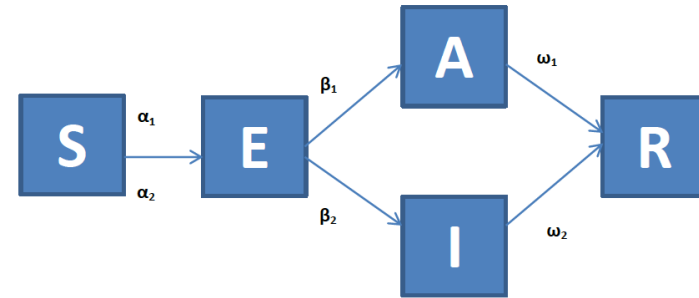
$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R$$

Modelo SEAIR



- Los individuos expuestos en la etapa de incubación (E) pueden:
 - desarrollar síntomas y pasar a la etapa de infeccioso (I) o
 - no desarrollarlos y pasar a la etapa de infección asintomática (A).
- En los dos casos los individuos podrán infectar a otros sanos.
- Los individuos enfermos tendrán una probabilidad de infección menor
 - estos individuos están sometidos a un control más específico por parte de las autoridades médicas

Modelo SEAIR



- Las ecuaciones son:

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha_1 \cdot S \cdot A - \alpha_2 \cdot S \cdot I$$

$$\frac{dE}{dt} = \alpha_1 \cdot S \cdot A + \alpha_2 \cdot S \cdot I - \beta_1 \cdot E - \beta_2 \cdot E$$

$$\frac{dA}{dt} = \beta_1 \cdot E - \omega_1 \cdot A$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta_2 \cdot E - \omega_2 \cdot I$$

$$\frac{dR}{dt} = \omega_1 \cdot A + \omega_2 \cdot I$$

α_1 : parámetro relacionado con la infectividad de los individuos asintomáticos hacia los susceptibles.

α_2 : parámetro relacionado con la infectividad de los individuos enfermos hacia los susceptibles.

β_1 : flujo del compartimento de infectados al de asintomáticos, relacionado con el tiempo de diferenciación de infectado a asintomático.

β_2 : flujo del compartimento de infectados al de enfermos, relacionado con el tiempo de diferenciación de infectado a enfermo.

ω_1 : flujo del compartimento de asintomáticos al de recuperados, relacionado con el tiempo de recuperación de los individuos asintomáticos.

ω_2 : flujo del compartimento de enfermos al de recuperados, relacionado con el tiempo de recuperación de los individuos enfermos.

Otros modelos de infección

- **Modelo SIS (Susceptible, Infectado, Susceptible):**
 - En este modelo, los individuos pasan del estado susceptible al infectado y luego regresan al estado susceptible.
 - Se utiliza para enfermedades donde la infección no confiere inmunidad duradera, como el resfriado común.
- **Modelo MSIR (Maternal, Susceptible, Infectado, Recuperado):**
 - Agrega un compartimento adicional para individuos con inmunidad maternal (M) al principio de sus vidas.
 - Es útil para modelar enfermedades donde la inmunidad se transmite de madres a hijos.
- **Modelo Malaria:**
 - Modelos específicos para la malaria suelen tener múltiples compartimentos para representar las etapas del parásito en humanos y mosquitos.
 - Incluye compartimentos para mosquitos susceptibles e infectados.
- **Modelo SIRS (Susceptible, Infectado, Recuperado, Susceptible):**
 - Similar al SIR, pero con un retorno del estado recuperado al susceptible.
 - Utilizado para enfermedades donde la inmunidad post-infección disminuye con el tiempo.
- **Modelo SVIR (Susceptible, Vacunado, Infectado, Recuperado):**
 - Incluye un compartimento para individuos vacunados.
 - Útil para estudiar el impacto de las campañas de vacunación.
- **Modelo SEIRS (Susceptible, Expuesto, Infectado, Recuperado, Susceptible):**
 - Una extensión del SEIR con regreso de recuperados a susceptibles.
 - Aplicable a enfermedades con inmunidad temporal después de la recuperación.

Ejemplos

- Incluir [movilidad](#)
- Incluir [redes de contactos](#)
- Otro ejemplo de [Covid](#)
- Ejemplo más real: [Simulación](#) Covid 1 Argentina

Otros modelos ...

- Modelos económicos
 - Hamill, L., & Gilbert, G. N. (2016). Agent-based modelling in economics. Chichester: Wiley.
 - Fundamentos teóricos y metodológicos de la utilización de ABS en economía: modelos de demanda, de mercado, mercado laboral, mercado internacional, banca, ...
- Red eléctrica
 - Ringler, P., Keles, D., & Fichtner, W. (2016). Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets—a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 205-215.
- Transporte. Movilidad
 - Bazzan, A. L., & Klügl, F. (2014). A review on agent-based technology for traffic and transportation. *The Knowledge Engineering Review*, 29(3), 375.
- Salud
 - Tracy, M., Cerdá, M., & Keyes, K. M. (2018). Agent-based modeling in public health: current applications and future directions. *Annual review of public health*, 39, 77-94.