

HACIA UN MODELO EPIDEMIOLOGICO para el **COVID-19** en el **SUR PROVINCIA CÓRDOBA**



Seminario de formación e investigación: "Tópicos de la modelización y estimación de la propagación de Covid-19"
Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas,
Físico-Químicas



Plan de la charla

Objetivos

Implementaciones prácticas modelos

 Recursos utilizados

 Visualización

 Modelización

 Descripción modelo

 Resultados

Hacia un modelo superador

 Heterogeneidad espacial

 Discretizando el tiempo

 Haciendo jugar al azar

Objetivos

1. Proveer herramientas matemáticas de análisis e interpretación de datos y de predicción de la evolución de la epidémia del COVID-19, con especial atención en la región del Sur de Córdoba.

Objetivos

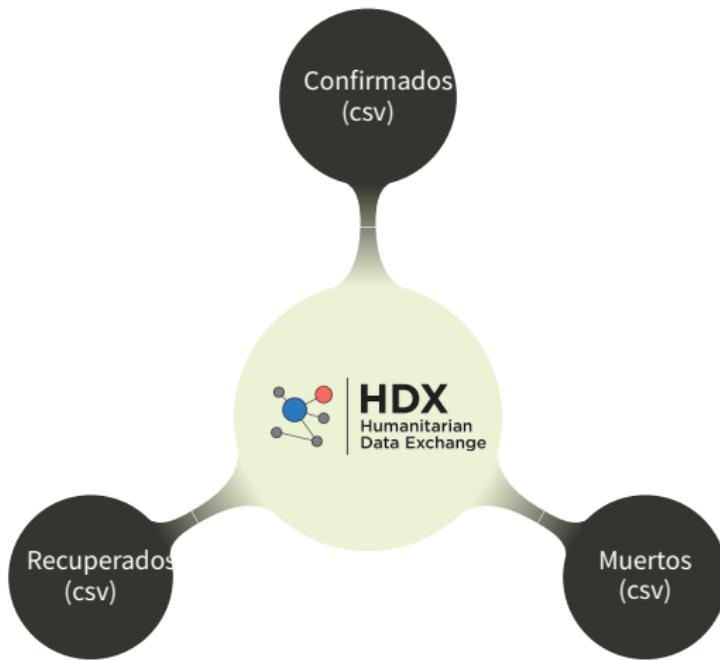
1. Proveer herramientas matemáticas de análisis e interpretación de datos y de predicción de la evolución de la epidémia del COVID-19, con especial atención en la región del Sur de Córdoba.
2. Promover el diálogo entre distintas áreas de la matemática a los efectos de abordar el problema desde una perspectiva integral. Los fenómenos que se pretenden modelar son complejos y requieren una respuesta compleja que involucrando varios temas: Sistemas Dinámicos, Control Óptimo, Probabilidad, Estadística, EDO, PDE, Optimización.

Objetivos

1. Proveer herramientas matemáticas de análisis e interpretación de datos y de predicción de la evolución de la epidémia del COVID-19, con especial atención en la región del Sur de Córdoba.
2. Promover el diálogo entre distintas áreas de la matemática a los efectos de abordar el problema desde una perspectiva integral. Los fenómenos que se pretenden modelar son complejos y requieren una respuesta compleja que involucrando varios temas: Sistemas Dinámicos, Control Óptimo, Probabilidad, Estadística, EDO, PDE, Optimización.
3. Fomentar el estudio teórico de los modelos epidemiológicos.

Fuente de datos internacionales

The Humanitarian Data Exchange: actualización diaria



Fuente de Datos Nacionales



Datasets Series Organizaciones

Casos COVID-19

Información actualizada diariamente a las 20:00 hs. notificando CASOS COVID-19 registrados en el país con un corte del día a las 17:45 hs.

DESCARGAR

Campos de este recurso

Titulo de la columna	Tipo de dato	Descripción
id_evento_caso	Número entero (integer)	Número de caso
SEXO	Texto (string)	Sexo
edad	Número entero (integer)	Edad
edad_anos_meses	Texto (string)	Edad indicada en meses o años
residencia_pais_nombre	Texto (string)	País de residencia
residencia_provincia_nombre	Texto (string)	Provincia de residencia
residencia_departamento_nombre	Texto (string)	Departamento de residencia
carga_provincia_nombre	Texto (string)	Provincia de establecimiento de carga
fecha_inicio_sintomas	Fecha ISO-8601 (date)	Fecha de inicio de síntomas
fecha_apertura	Fecha ISO-8601 (date)	Fecha de apertura del caso
sepi_apertura	Número entero (integer)	Semana Epidemiológica de fecha de apertura
fecha_internacion	Fecha ISO-8601 (date)	Fecha de internación
cuidado_intensivo	Texto (string)	Indicación si estuvo en cuidado intensivo
fecha_cui_intensivo	Fecha ISO-8601 (date)	Fecha de ingreso a cuidado intensivo en el caso de corresponder
fallecido	Texto (string)	Indicación de fallecido
fecha_fallecimiento	Tiempo ISO-8601 (time)	Fecha de fallecimiento en el caso de corresponder
asistencia_respiratoria_mecanica	Texto (string)	Indicación si requirió asistencia respiratoria mecánica
carga_provincia_id	Número entero (integer)	Código de Provincia de carga
origen_financiamiento	Texto (string)	Origen de financiamiento
clasificacion	Texto (string)	Clasificación manual del registro
clasificacion_resumen	Texto (string)	Clasificación del caso
residencia_provincia_id	Número entero (integer)	Código de Provincia de residencia

Fuente de Datos Nacionales



Datasets Series Organizaciones

Título de la columna	Tipo de dato	Descripción
fecha_diagnostico	Tiempo ISO-8601 (time)	Fecha de diagnóstico
residencia_departamento_id	Número entero (integer)	Código de Departamento de residencia
ultima_actualizacion	Fecha ISO-8601 (date)	Última actualización

Al 7/10/2020:
[2141742 rows x 25 columns] 485.6 MB

Cartografía

Instituto Geográfico Nacional

Instituto Geográfico Nacional | de la República Argentina - Mozilla Firefox

Archivo Editar Ver Histórial Marcadores Herramientas Ayuda

python - Búsqueda de Google X Instituto Geográfico Nacional X +

https://www.ign.gob.ar

Traductor de Google Más visitados Exactas UNLPam Universidad Naciona... Facultad de Ciencias ... http://www.bnai.com... http://www.conicet.g... AFIP http://dmat.exa.unrc... Argentina Ministerio de Defensa

Nuestro Instituto Nuestras Actividades Nuestros Servicios

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Información geoespacial
Capas SIG
Servicios WMS y WFS
Geoportal

Geodesia
Archivos GPS
Redes geodésicas
Modelos digitales de elevaciones

Sensores remotos
Vuelos fotogramétricos
Imágenes satelitales
Relevamientos con drones

Geografía
Nomenclador geográfico
Datos geográficos
Aprobación de obras y publicaciones

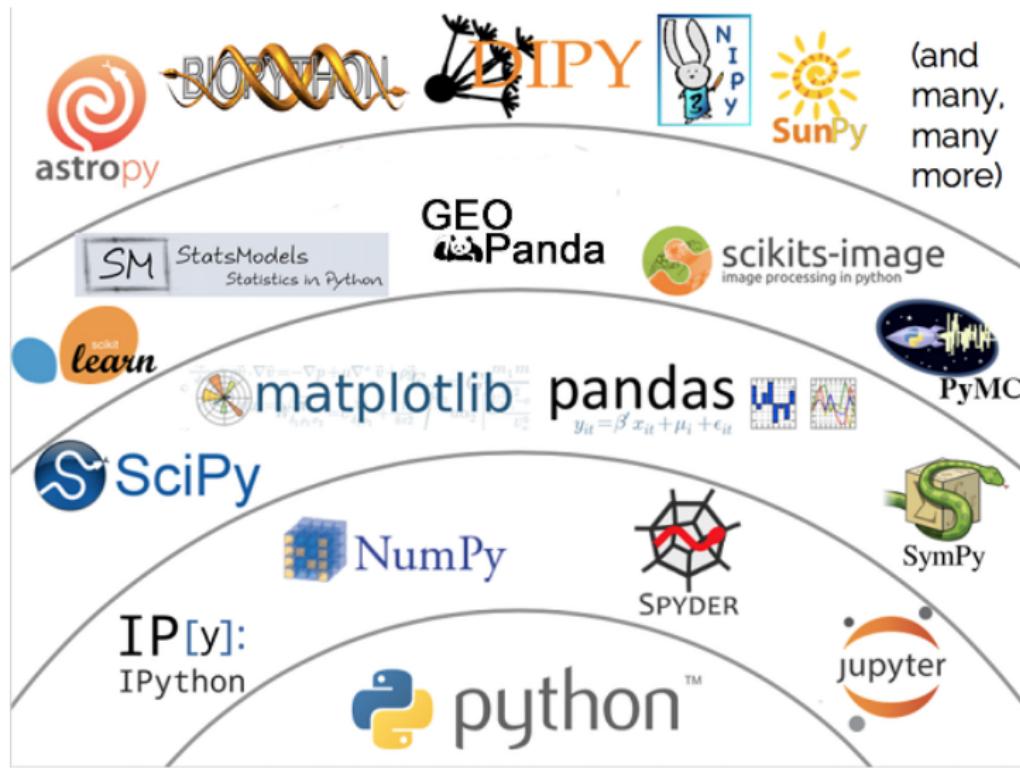
Cartografía
Productos cartográficos
Manual de signos cartográficos
Impresión de cartografía

Geoportal
Principales servicios y productos del IGN

Universidad CharlaSEMCovid.te... Dinámica COVID-19 ... [Sin nombre]-1.0 (Co... Instituto Geográfico ...

Lenguajes y librerías

Python



Alojamiento proyecto git hub

fdmazzone/COVID-19: Rutinas para modelizar la epidemia COVID-19 - Mozilla Firefox

Archivo Editar Ver Historial Marcadores Herramientas Ayuda

WhatsApp x fdmazzone/COVID-19: Rutina x +

Traductor de Google Más visitados | Exactas UNLPam Universidad Naciona... Facultad de Ciencias ... http://www.bna.com... http://www.conicet.g... AFIP http://dmat.exa.unrc...

fdmazzone / COVID-19

<> Code Issues Pull requests Actions Projects Wiki Security Insights Settings

master 1 branch 0 tags Go to file Add file Code

fdmazzone 8-10-2020 3e93fes 21 hours ago 61 commits

Experiments 3-10-no se que cambios hay 6 days ago

Imagenes Varios cambios 29 days ago

programas 8-10-2020 21 hours ago

README.md Varios cambios 29 days ago

About

Rutinas para modelizar la epidemia COVID-19

Readme

Releases

No releases published Create a new release

Packages

No packages published Publish your first package

Environments 1

github-pages Active

Languages

Python 100.0%

Menú fdmazzone/COVID-19: Rutinas para modelizar la epidemia COVID-19 - Mozilla Firefox [Inbox - fdmazzone... fdmazzone/COVID-19... content.tex - Kile Programa de manipulación 9 / 44

READMD.md

COVID-19

Librería para modelizar y visualizar la epidemia COVID-19

Se proveen dos modulos, uno de modelización y uno de visualización.

- FitSEIR.py: contiene varias funciones con la finalidad de descargar datos mundiales y Argentinos ([Ministerio de Salud de la República Argentina](#)), actualizados sobre la pandemia de COVID-19 y ajustar los parámetros de un modelo SEIR a estos datos.

Página web proyecto

git hub

Instituto Geográfico Nacional COVID-19-Mat.UNRC

Más visitados | Exactas UNLPam | Universidad Naciona... | Facultad de Ciencias ... | http://www.bna.com... | http://www.conicet.g... | AFIP | http://

COVID-19-Mat.UNRC

[View On GitHub](#)

Visualización Datos

- Animaciones
- Córdoba, casos acumulados 01/04/2020-02/10/2020
- Argentina, casos acumulados 01/04/2020-02/10/2020
- AMBA casos acumulados y diarios 01/04/2020-06/10/2020
- Argentina
- Córdoba
- Departamento Río Cuarto

Modelización

- Argentina
- Provincias

Project maintained by [fdmazzone](#)

Hosted on GitHub Pages - Theme by [mattgraham](#)

Casos acumulados última semana

Casos Totales
Argentina(2020-09-26 , 2020-10-02)

Casos cada 100k
Argentina(2020-09-26 , 2020-10-02)

Córdoba

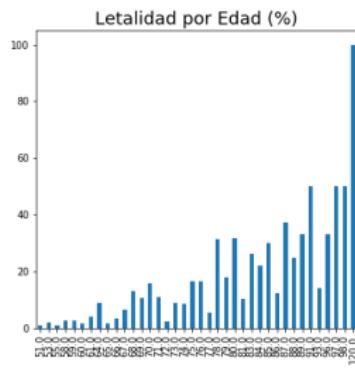
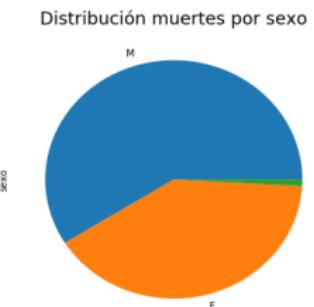
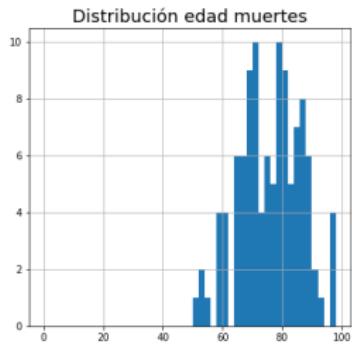
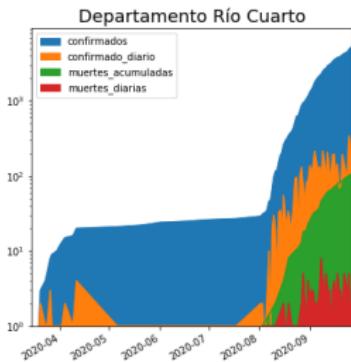
Animaciones

Córdoba

Animaciones

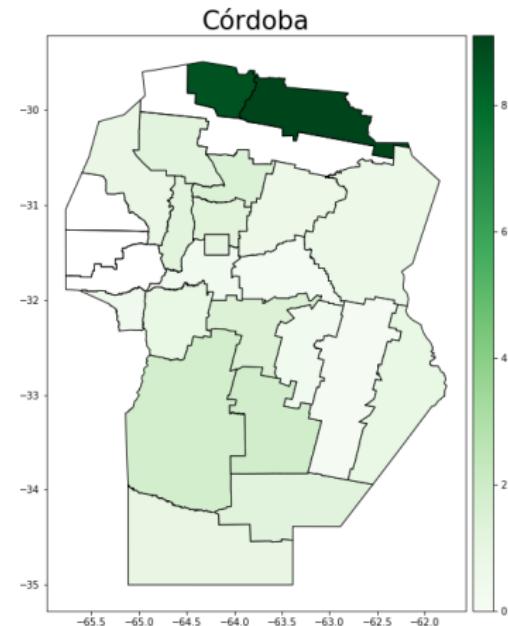
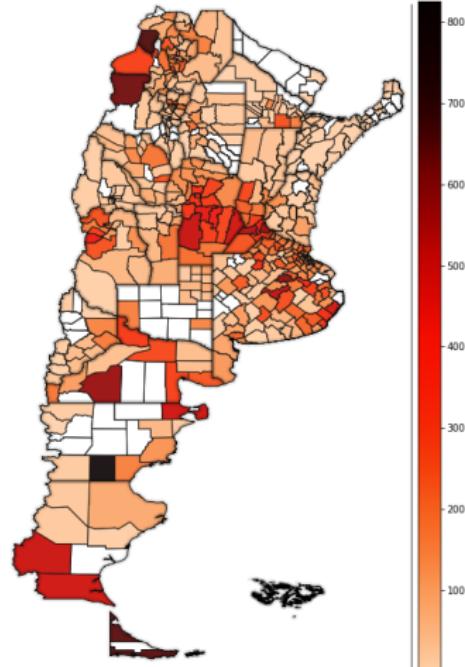
AMBA

Estadísticas

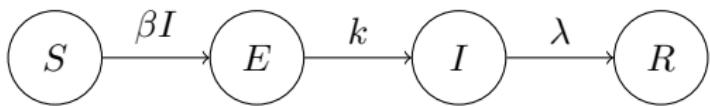


Información regionalizada

Argentina(2020-09-26 , 2020-10-02)

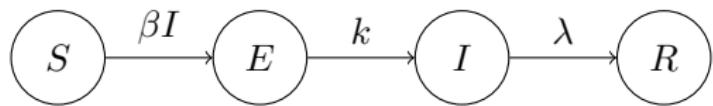


Modelo SEIR



$$\begin{cases} S' = -\beta IS, \\ E' = \beta IS - kE \\ I' = kE - \lambda I, \\ R' = \lambda I \end{cases}$$

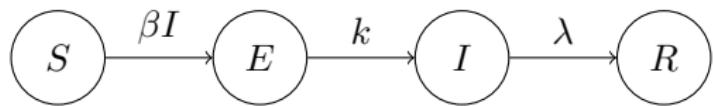
Modelo SEIR



$$\begin{cases} S' = -\beta IS, \\ E' = \beta IS - kE \\ I' = kE - \lambda I, \\ R' = \lambda I \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} \hat{S}' = -\mathcal{R}_0 \hat{I} \hat{S}, \\ \hat{E}' = \mathcal{R}_0 \hat{I} \hat{S} - q \hat{E} \\ \hat{I}' = q \hat{E} - \hat{I}, \\ \hat{R}' = \hat{I} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \hat{S} &:= S/N & s &:= t \boxed{\lambda} \\ \hat{E} &:= E/N & \mathcal{R}_0 &:= \boxed{\beta N} / \lambda \\ \hat{I} &:= I/N & q &:= \boxed{k} / \lambda \\ \hat{R} &:= R/N \end{aligned}$$

Modelo SEIR



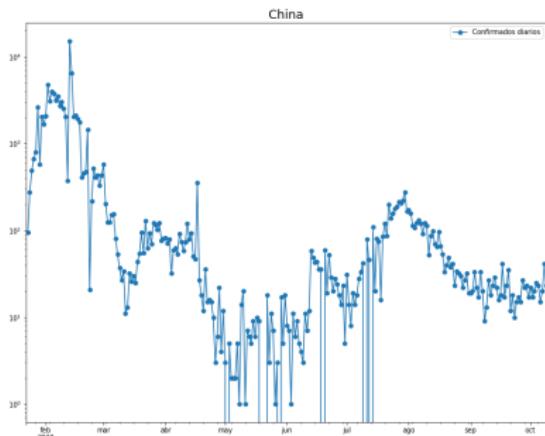
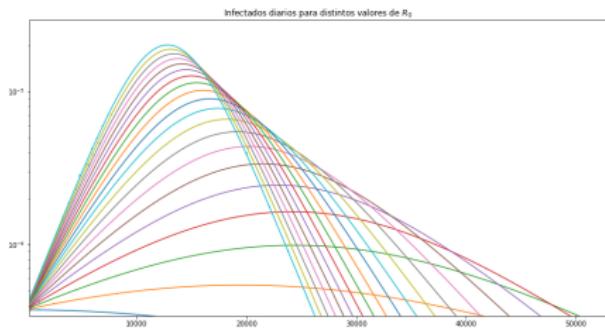
$$\begin{cases} S' = -\beta IS, \\ E' = \beta IS - kE \\ I' = kE - \lambda I, \\ R' = \lambda I \end{cases} \xrightarrow{\quad} \begin{cases} \hat{S}' = -\mathcal{R}_0 \hat{I} \hat{S}, \\ \hat{E}' = \mathcal{R}_0 \hat{I} \hat{S} - q \hat{E} \\ \hat{I}' = q \hat{E} - \hat{I}, \\ \hat{R}' = \hat{I} \end{cases}$$

$$\hat{S} := S/N \quad s := t/\lambda \quad \text{Periodo infecciosidad}$$

$$\hat{E} := E/N \quad \mathcal{R}_0 := \frac{\beta N}{\lambda} \quad \text{Número reproductivo básico}$$

$$\hat{I} := I/N \quad q := k/\lambda \quad \text{Periodo exposición}$$

Realidad vs ficción



Factores a considerar

1. Medidas sanitarias

Factores a considerar

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad-Heterogeneidad

Factores a considerar

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad-Heterogeneidad
3. Proceso determinista o estocástico

Factores a considerar

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad-Heterogeneidad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad

Factores a considerar

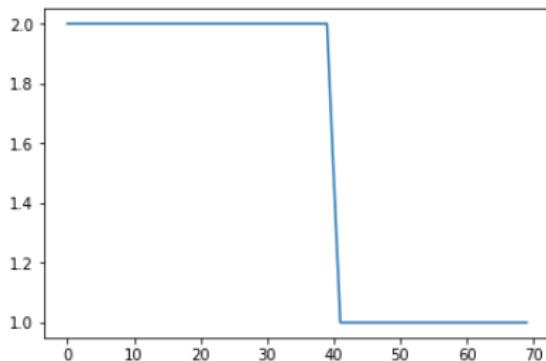
1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad-Heterogeneidad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad
5. Deficiencia de datos, ¿Hay más enfermos que los asentados en las bases?

Factores a considerar

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad-Heterogeneidad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad
5. Deficiencia de datos, ¿Hay más enfermos que los asentados en las bases?
6. Demografía

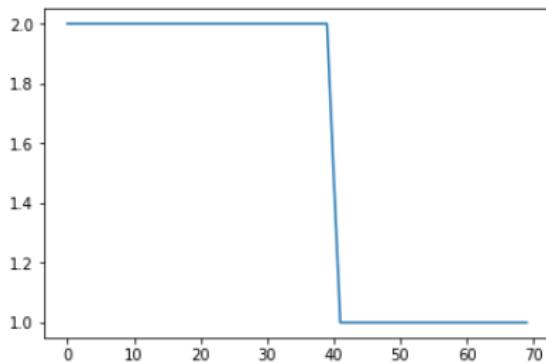
Modelo implementado

$\mathcal{R}_0(t; t_{corte})$ función “escalera continua”.



Modelo implementado

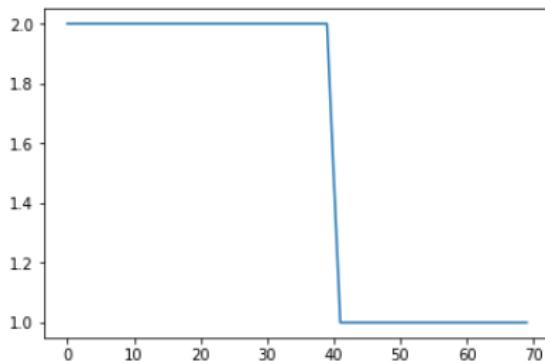
$\mathcal{R}_0(t; t_{corte})$ función “escalera continua”.



t_{corte} vector de tiempos

Modelo implementado

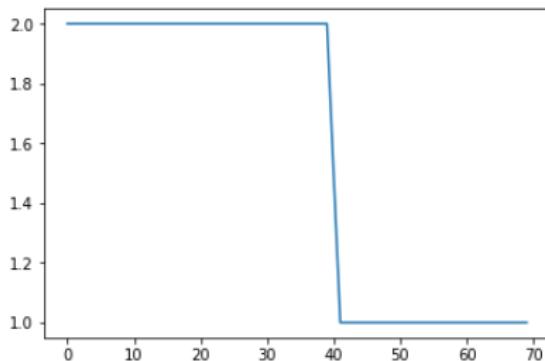
$\mathcal{R}_0(t; t_{corte})$ función “escalera continua”.



t_{corte} vector de tiempos
Periodo de exposición= 5 días

Modelo implementado

$\mathcal{R}_0(t; t_{corte})$ función “escalera continua”.



t_{corte} vector de tiempos

Periodo de exposición= 5 días

Periodo infecciosidad = 3 días

Modelo implementado

Parámetros ajustables

- Parte o todos los valores de \mathcal{R}_0 .

Modelo implementado

Parámetros ajustables

- Parte o todos los valores de \mathcal{R}_0 .
- Condición inicial, se propone $(S_{data}, 0, I_{acum-data} \times \alpha, I_{acum-data} \times (1 - \alpha))$. Se ajusta α .

Modelo implementado

Parámetros ajustables

- Parte o todos los valores de \mathcal{R}_0 .
- Condición inicial, se propone $(S_{data}, 0, I_{acum-data} \times \alpha, I_{acum-data} \times (1 - \alpha))$. Se ajusta α .
- Parte o todas las componentes de t_{corte} .

Modelo implementado

Parámetros ajustables

- Parte o todos los valores de \mathcal{R}_0 .
- Condición inicial, se propone $(S_{data}, 0, I_{acum-data} \times \alpha, I_{acum-data} \times (1 - \alpha))$. Se ajusta α .
- Parte o todas las componentes de t_{corte} .
- Se arma una función

$$(t; \mathcal{R}_0, t_{corte}, \alpha) \mapsto (S, E, I, R) = \text{Modelo}(t; \mathcal{R}_0, t_{corte}, \alpha).$$

Modelo implementado

Parámetros ajustables

- Parte o todos los valores de \mathcal{R}_0 .
- Condición inicial, se propone $(S_{data}, 0, I_{acum-data} \times \alpha, I_{acum-data} \times (1 - \alpha))$. Se ajusta α .
- Parte o todas las componentes de t_{corte} .
- Se arma una función

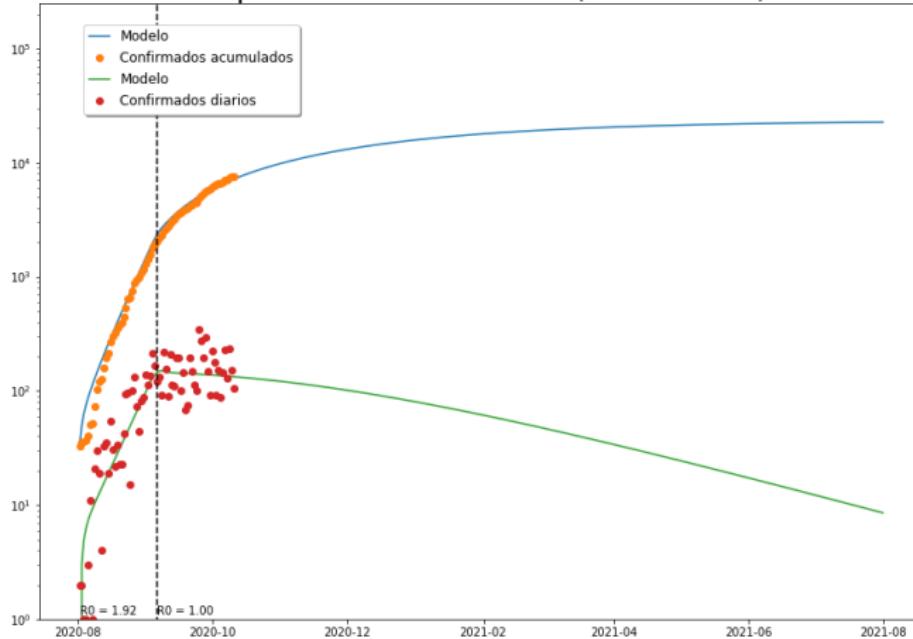
$$(t; \mathcal{R}_0, t_{corte}, \alpha) \mapsto (S, E, I, R) = \text{Modelo}(t; \mathcal{R}_0, t_{corte}, \alpha).$$

- Se usa minimizador global para hallar mínimo de

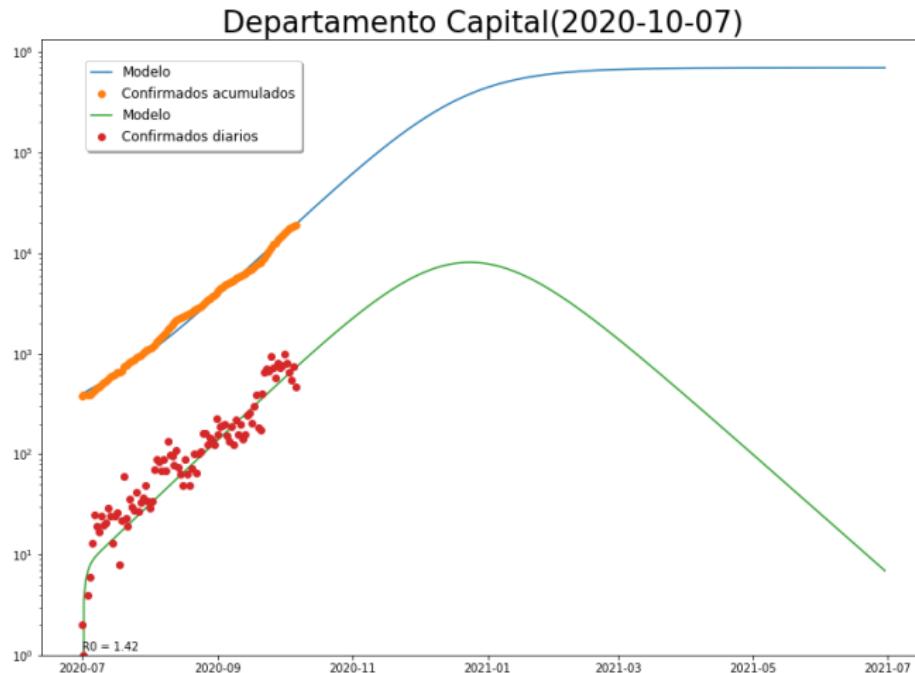
$$\sum_{t \in \text{historia}} |I_{data-acum}(t) - E(t) - I(t) - R(t)|^2$$

Departamento Río Cuarto

Departamento Río Cuarto(2020-10-11)

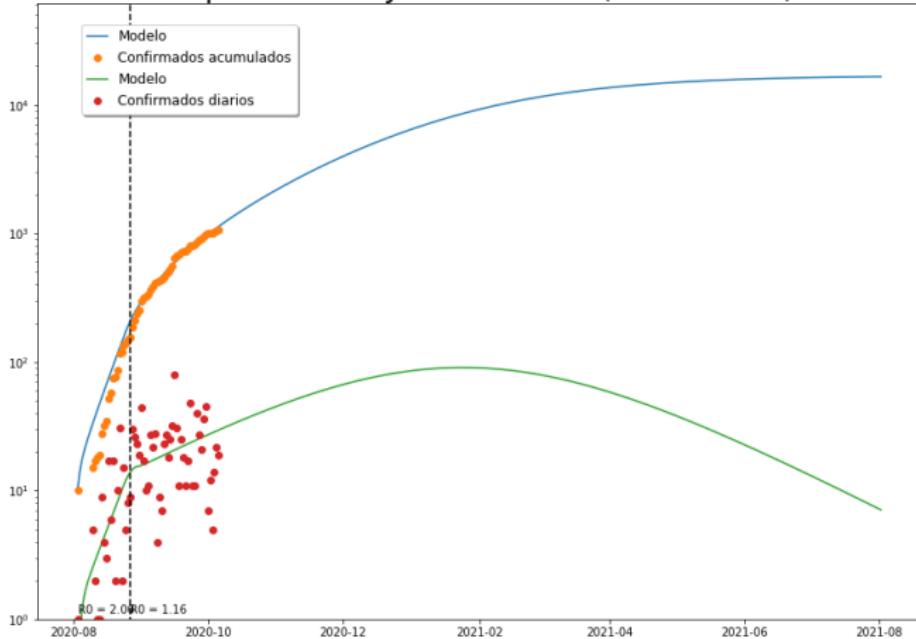


Departamento Córdoba Capital

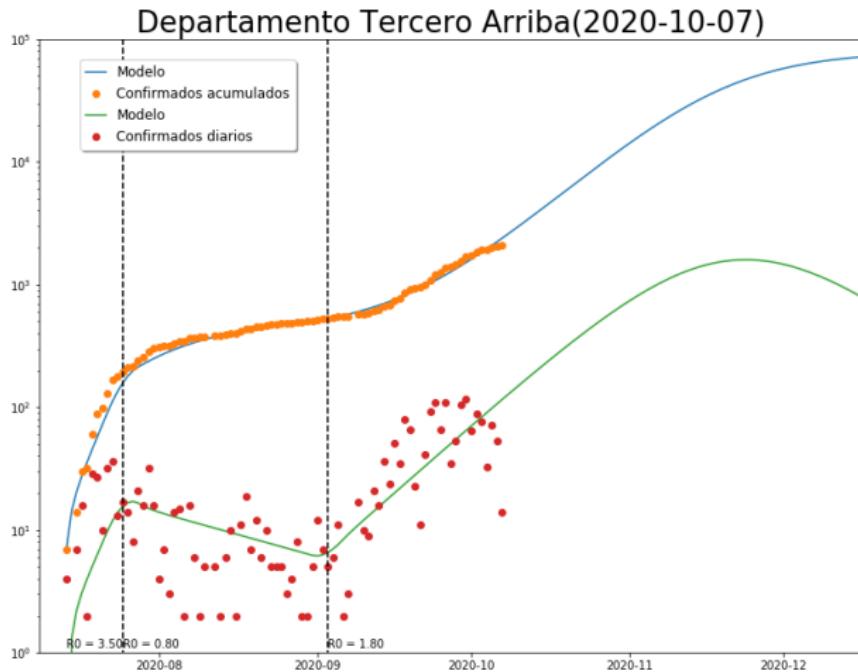


Departamento Juárez Celman

Departamento Juárez Celman(2020-10-06)

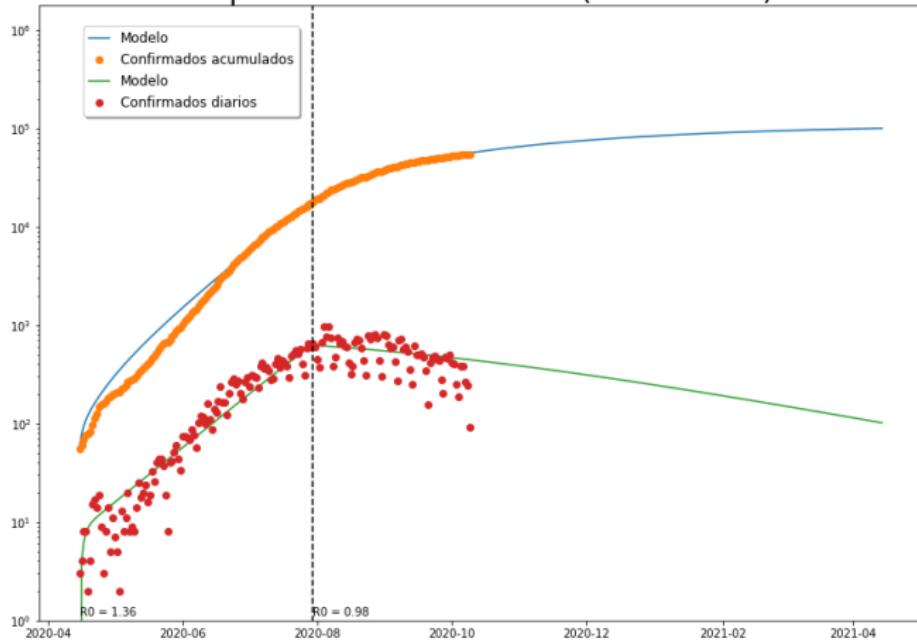


Departamento Tercero Arriba

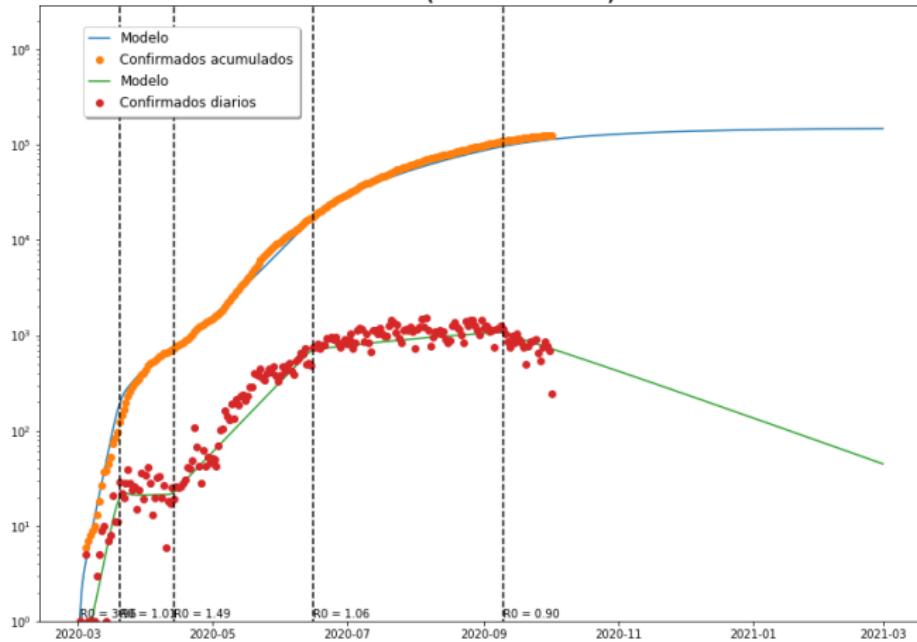


La Matanza-Buenos Aires

Departamento La Matanza(2020-10-10)

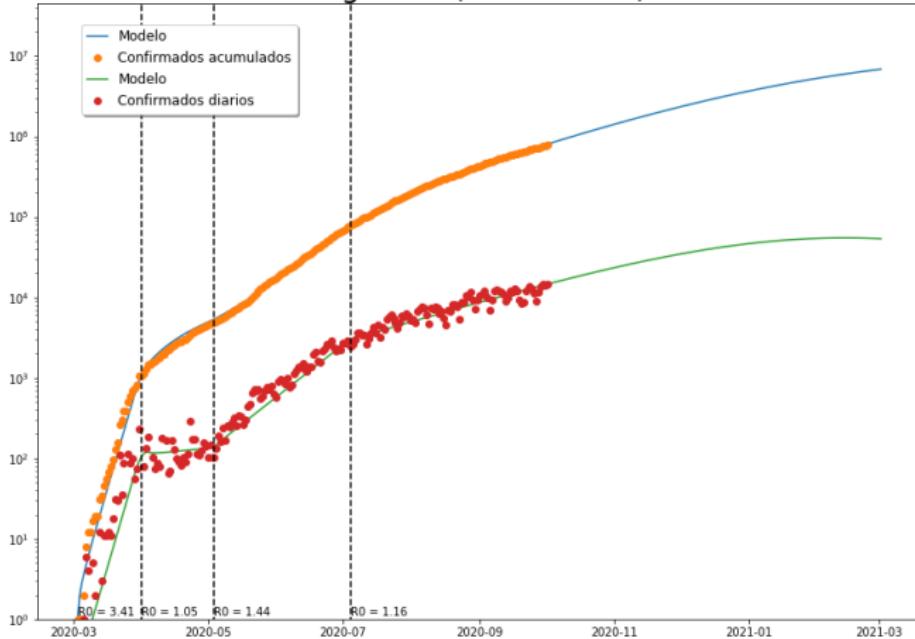


CABA(2020-10-03)



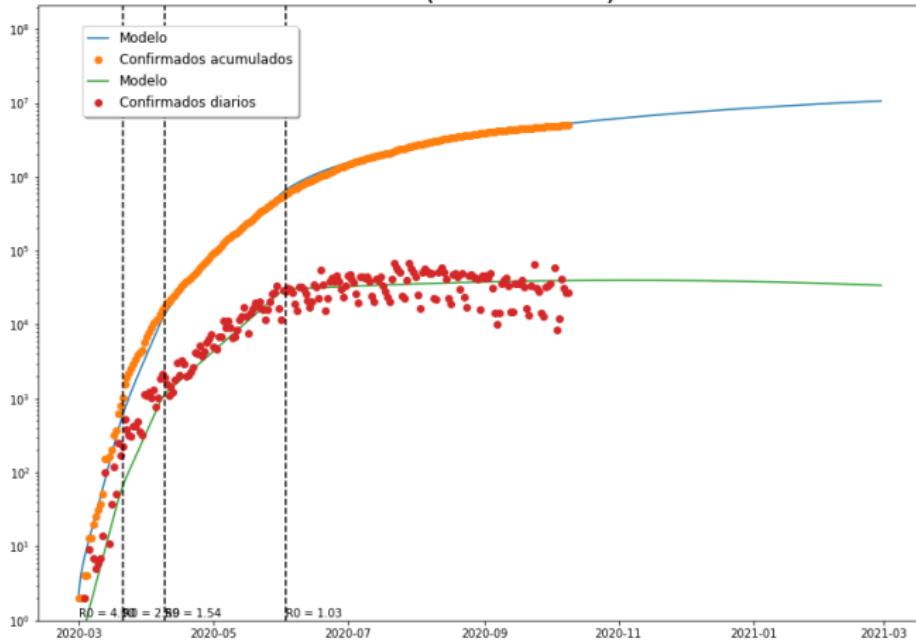
Argentina

Argentina(2020-10-03)



Brasil

Brazil(2020-10-10)



Revisando suposiciones

1. Medidas sanitarias

Revisando suposiciones

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad o heterogeniedad

Revisando suposiciones

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad o heterogeniedad
3. Proceso determinista o estocástico

Revisando suposiciones

1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad o heterogenidad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad

Revisando suposiciones

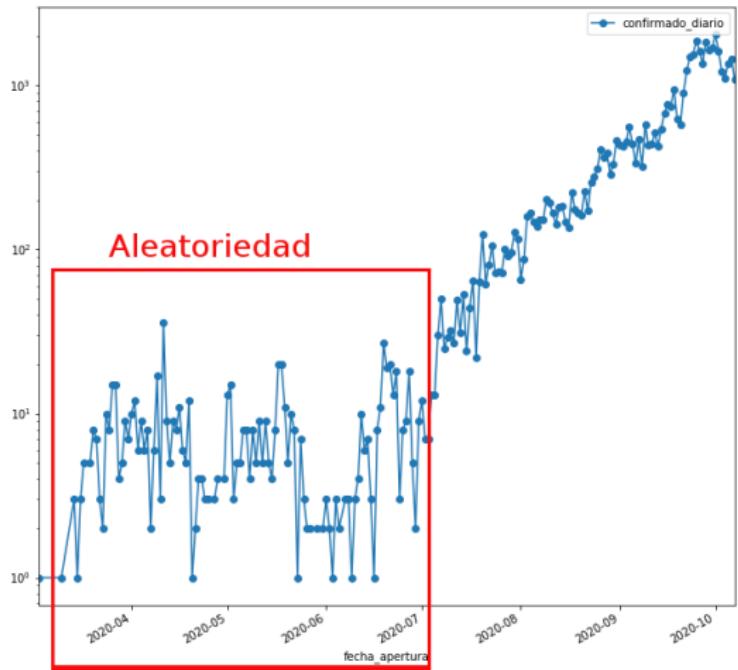
1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad o heterogeniedad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad
5. Deficiencia de datos

Revisando suposiciones

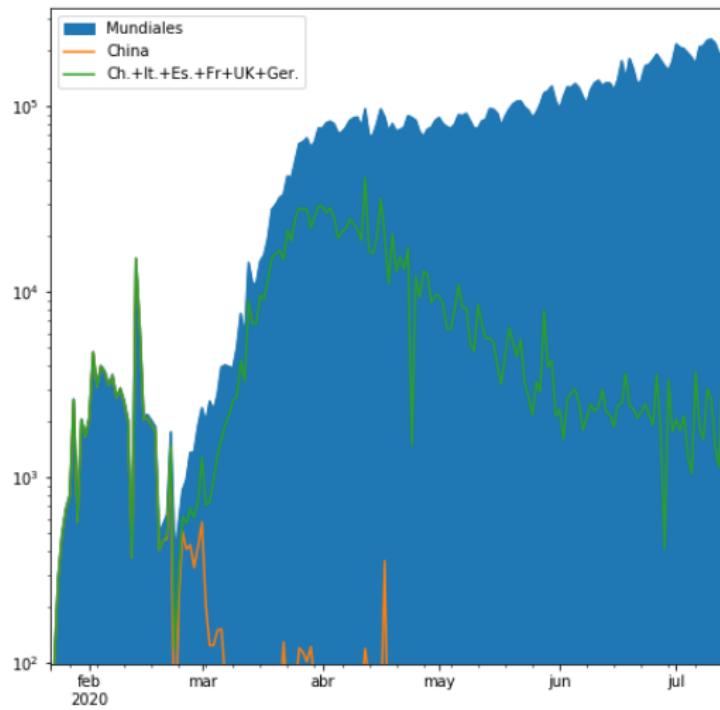
1. Medidas sanitarias
2. Homogeneidad o heterogeniedad
3. Proceso determinista o estocástico
4. Movilidad
5. Deficiencia de datos
6. Demografía

Evidencia aleatoriedad

Confirmados diarios Dpto Córdoba Capital



Evidencia heterogeneidad espacial



Heterogeneidad espacial

Perspectivas

Maia Martcheva. An Introduction to Mathematical Epidemiology, Springer (2015)

Heterogeneidad espacial

Perspectivas

Maia Martcheva. An Introduction to Mathematical Epidemiology, Springer (2015)

- Metapoblaciones
- Redes espaciales
- Retículos
- Autómatas
- Modelos epidémicos con difusión sobre espacio continuo (PDE)
- Modelos epidémicos con difusión sobre grafos (PDE sobre grafos, Hugo Aimar)

Heterogeneidad espacial

Metapoblaciones

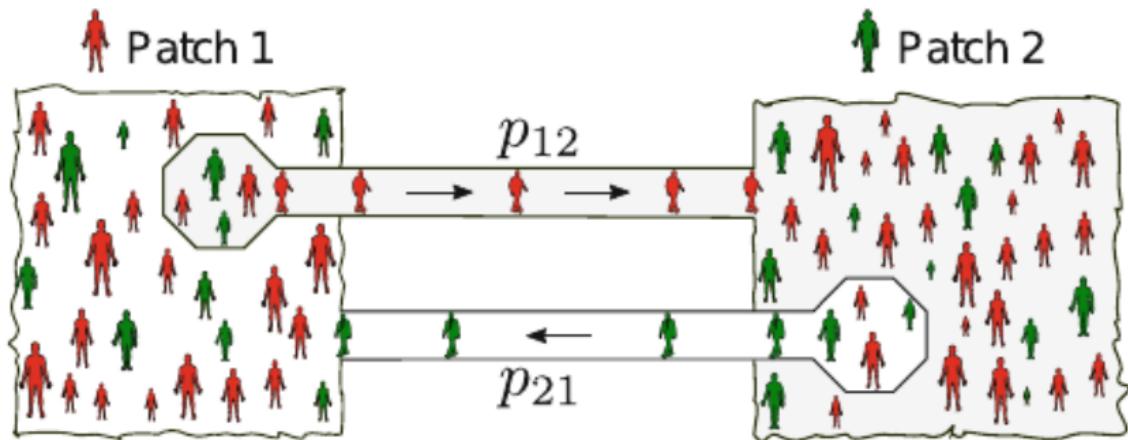
Metapoblación

Grupo de poblaciones de la misma especie que ocupan áreas espacialmente aisladas (*parches*) pero interactúan en algún nivel (*Movilidad*)

Movilidad

Lagrangiana-Euleriana

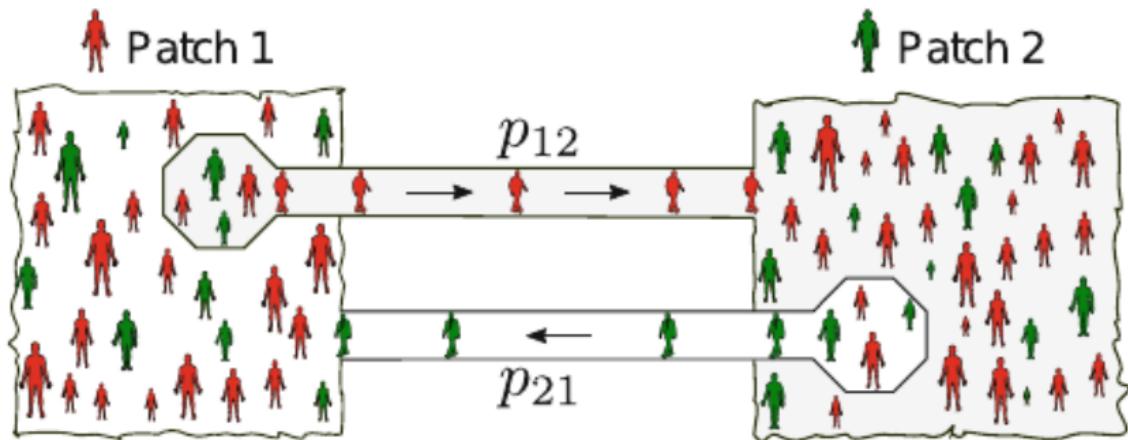
1. Lagrangiana: va de un parche a otro y regresa.



Movilidad

Lagrangiana-Euleriana

1. Lagrangiana: va de un parche a otro y regresa.
2. Euleriana: va de un parche a otro y permanece.

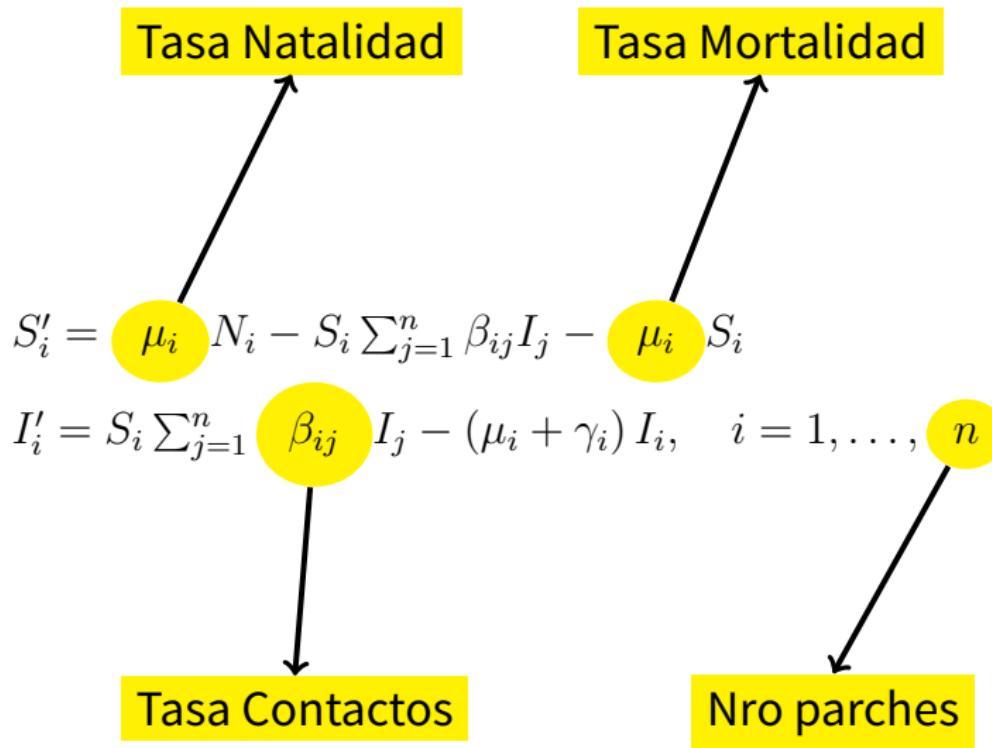


Movilidad Lagrangiana

$$S'_i = \mu_i N_i - S_i \sum_{j=1}^n \beta_{ij} I_j - \mu_i S_i$$
$$I'_i = S_i \sum_{j=1}^n \beta_{ij} I_j - (\mu_i + \gamma_i) I_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Movilidad

Lagrangiana



Movilidad

Lagrangiana

$$S'_i = \mu_i N_i - \beta_i S_i I_i - \mu_i S_i - \sum_{j=1}^n m_{ji}^S S_i + \sum_{j=1}^n m_{ij}^S S_j$$
$$I'_i = \beta_i S_i I_i - (\mu_i + \gamma_i) I_i - \sum_{j=1}^n m_{ji}^I I_i + \sum_{j=1}^n m_{ij}^I I_j, \quad i = 1, \dots, n$$

Movilidad

Lagrangiana

Tasa migratoria susceptibles desde parche j a parche i

$$S'_i = \mu_i N_i - \beta_i S_i I_i - \mu_i S_i - \sum_{j=1}^n m_{ji}^S S_i + \sum_{j=1}^n m_{ij}^S S_j$$

$$I'_i = \beta_i S_i I_i - (\mu_i + \gamma_i) I_i - \sum_{j=1}^n m_{ji}^I I_i + \sum_{j=1}^n m_{ij}^I I_j, \quad i = 1, \dots, n$$

Tasa migratoria infectados desde parche j a parche i

Modelos discretos

Ejemplo: SIR discreto

$$S'(t) \approx \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t}, \quad I'(t) \approx \frac{I(t + \Delta t) - I(t)}{\Delta t}.$$

$$\begin{cases} S(t + \Delta t) = S(t) - \mathcal{R}_0 IS \Delta t, \\ I(t + \Delta t) = I(t) + \mathcal{R}_0 IS \Delta t - I \Delta t, \\ R(t + \Delta t) = R(t) + I \Delta t \end{cases}$$

Modelos SIR estocásticos

Modelos SIR estocásticos

- En los modelos estocásticos se supone que la incidencia, movilidad, recuperación de individuos son variables aleatorias con esperanza igual a su correspondiente determinista.
- El tiempo se puede asumir discreto, eso nos lleva a una cadena de Markov en tiempo discreto (DTMC) y su realización son *ecuaciones en diferencias estocásticas* o se puede asumir t continuo: cadena de Markov en tiempo continuo (CTMC) y eso nos lleva a *ecuaciones diferenciales estocásticas*.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.
- Suponemos que la dinámica sigue un modelo SIR estocástico en cada parche con tasa de contactos β_i .

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.
- Suponemos que la dinámica sigue un modelo SIR estocástico en cada parche con tasa de contactos β_i .
- Hay movilidad Euleriana de individuos entre parches.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.
- Suponemos que la dinámica sigue un modelo SIR estocástico en cada parche con tasa de contactos β_i .
- Hay movilidad Euleriana de individuos entre parches.
- Se asume que tanto la movilidad como los contactos son variables aleatorias discretas con una distribución de Poisson con media igual al modelo determinista.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.
- Suponemos que la dinámica sigue un modelo SIR estocástico en cada parche con tasa de contactos β_i .
- Hay movilidad Euleriana de individuos entre parches.
- Se asume que tanto la movilidad como los contactos son variables aleatorias discretas con una distribución de Poisson con media igual al modelo determinista.
- La media de la movilidad de individuos del parche 1 al parche 2 por unidad de tiempo es la misma que la movilidad en sentido contrario $p_{12} = p_{21} = p$.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

DTMC, dos parches

- Se asume dos parches con N_1 y N_2 habitantes respectivamente. N_1 y N_2 son funciones de t , pero $N_1 + N_2$ es constante.
- Suponemos que la dinámica sigue un modelo SIR estocástico en cada parche con tasa de contactos β_i .
- Hay movilidad Euleriana de individuos entre parches.
- Se asume que tanto la movilidad como los contactos son variables aleatorias discretas con una distribución de Poisson con media igual al modelo determinista.
- La media de la movilidad de individuos del parche 1 al parche 2 por unidad de tiempo es la misma que la movilidad en sentido contrario $p_{12} = p_{21} = p$.
- Por cuestiones técnicas hay que discretizar el tiempo en saltos de Δt más chicos que una constante apropiada.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Difusión

Conocida las variables aleatorias $(S_i(t), I_i(t), R_i(t))$, $i = 1, 2$ en el momento t , la difusión-movilidad se calcula de la siguiente forma

- Definimos

$$\mu_i = \frac{p\Delta t}{N_i(t)}(S_i(t), I_i(t), R_i(t))$$

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Difusión

Conocida las variables aleatorias $(S_i(t), I_i(t), R_i(t))$, $i = 1, 2$ en el momento t , la difusión-movilidad se calcula de la siguiente forma

- Definimos

$$\mu_i = \frac{p\Delta t}{N_i(t)}(S_i(t), I_i(t), R_i(t))$$

- Usamos la función `poisson` de `numpy.random` que calcula muestras de variable aleatoria con una distribución de poisson y calculamos

$$(S_i^{mov}, I_i^{mov}, R_i^{mov}) = \text{poisson}(\mu_i)$$

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Difusión

- Calculamos la nueva distribución de población en el parche 1

$$(S_1^*, I_1^*, R_1^*) = (S_1, I_1, R_1)$$

$$- (S_1^{mov}, I_1^{mov}, R_1^{mov}) + (S_2^{mov}, I_2^{mov}, R_2^{mov})$$

En el parche 2 se hace lo mismo.

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Contagio y recuperación

- La cantidad total de contagios en el parche i es

$$\Delta I_i = \text{poisson}(\beta_i S_i^* I_i^* \Delta t)$$

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Contagio y recuperación

- La cantidad total de contagios en el parche i es

$$\Delta I_i = \text{poisson}(\beta_i S_i^* I_i^* \Delta t)$$

- La cantidad total de remociones en el parche i es

$$\Delta R_i = \text{poisson}(I_i^* \Delta t)$$

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Contagio y recuperación

- La cantidad total de contagios en el parche i es

$$\Delta I_i = \text{poisson}(\beta_i S_i^* I_i^* \Delta t)$$

- La cantidad total de remociones en el parche i es

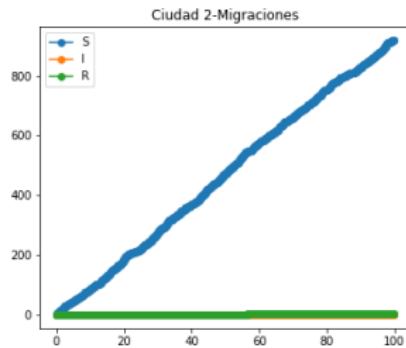
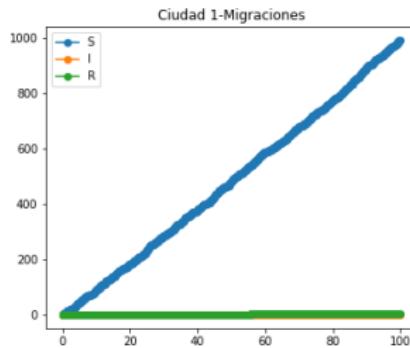
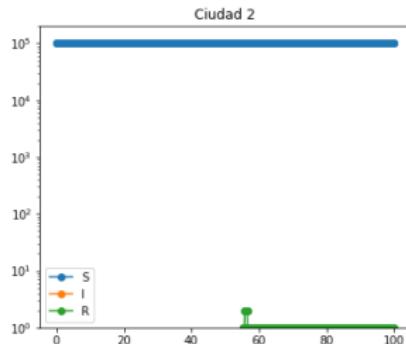
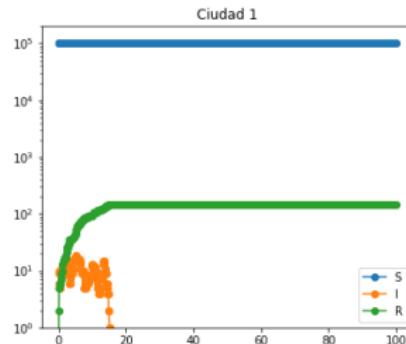
$$\Delta R_i = \text{poisson}(I_i^* \Delta t)$$

- Las nuevas cantidades en el momento $t + \Delta t$ son:

$$(S_i(t + \Delta t), I_i(t + \Delta t), R_i(t + \Delta t)) = (S_i^*, I_i^*, R_i^*) + (-\Delta I_i, \Delta I_i, \Delta R_i).$$

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

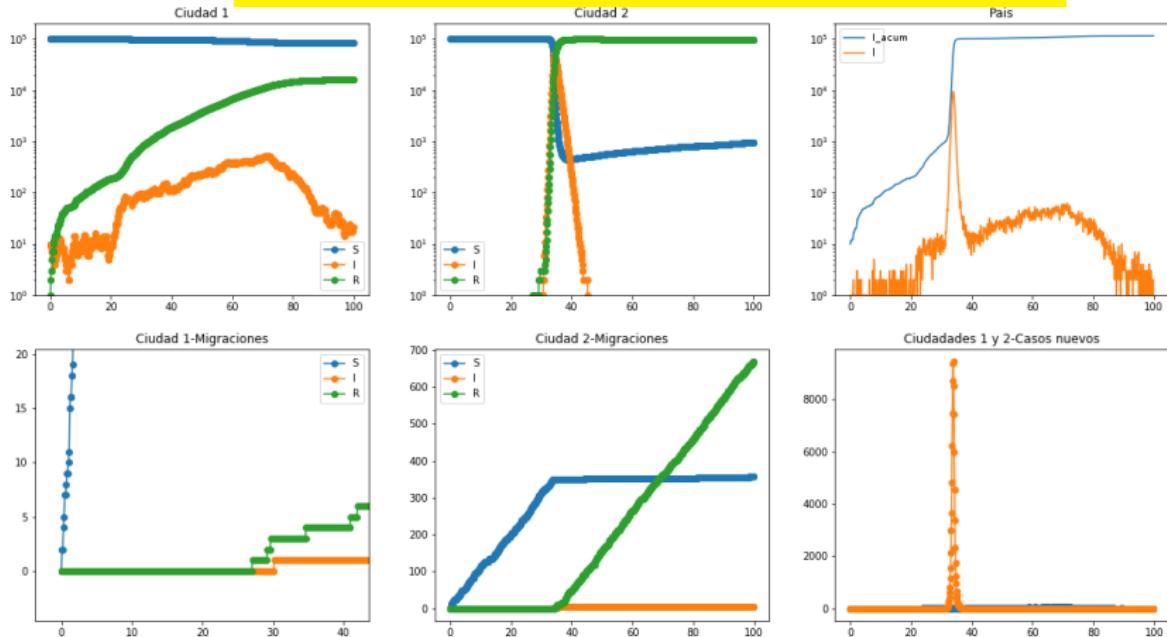
Experimento 1: $\mathcal{R}_0^1 = 1.1$, $\mathcal{R}_0^2 = 5.1$, $N_1 = N_2 = 100000$ y $p = 10$.



Extinción

Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Experimento 2: $\mathcal{R}_0^1 = 1.1$, $\mathcal{R}_0^2 = 5.1$, $N_1 = N_2 = 100000$ y $p = 10$.



Modelos metapoblaciones SIR estocásticos

Experimento 3: $\mathcal{R}_0^1 = 3$, $\mathcal{R}_0^2 = 2$, $N_1 = N_2 = 100000$ y $p = 5$.

