

Sistemas de Tiempo Real

INFORME FINAL

Simulación de la propagación del dengue y su
interacción con el ambiente

Carrera: Ingeniería en computación

Brian Llamocca 02037/9, Joaquín Matto 1754/9,

Nicolás Pacheco 01640/9, Augusto Borromeo

02342/6, Joaquín Stella 02020/8

13 de diciembre 2023



FACULTAD DE INFORMATICA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Introducción

Este informe abarca el detalle del contexto, procesamiento y análisis de los datos comprendidos en la simulación del dengue a lo largo de un año realizado por el grupo 5 en la cátedra de “Sistemas de Tiempo Real”. Dicho informe tiene como objetivo analizar el comportamiento del dengue en la ciudad de La Plata durante un año teniendo en cuenta la temperatura como factor ambiental, y su influencia sobre la población de mosquitos y la transmisión del virus DENV (causante de la enfermedad). Además, se buscó proyectar un aumento en las temperaturas medias anuales debido al cambio climático, para los años 2024, 2025 y 2030, y cómo el mismo impactaría sobre la propagación del dengue.

Contexto

En los últimos años, se ha visto un aumento a nivel mundial en la aparición de desastres naturales: inundaciones, sequías, nevadas y niveles récord de temperatura (tanto en máximos como en mínimos). Estos cambios en la meteorología es explicada a partir del fenómeno denominado como cambio climático, definido como “los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos”. Esto tiene un impacto tanto climático como ecológico y social, generando nuevas problemáticas y conflictos.

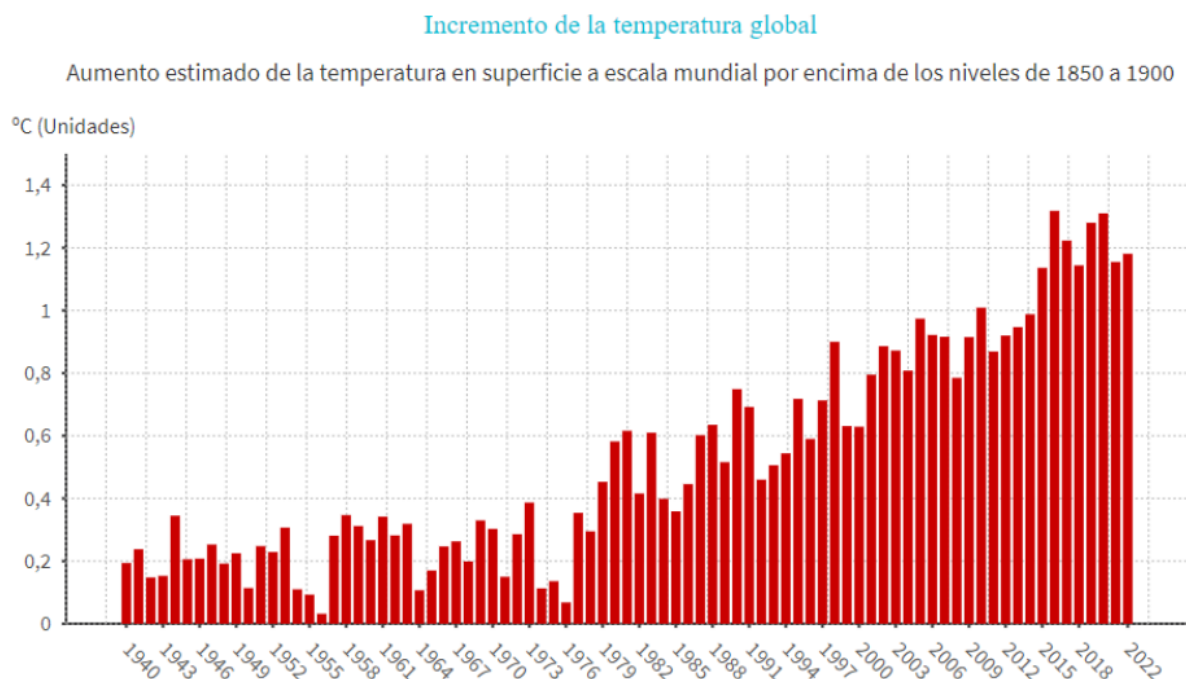


Figura 1. Incremento de la temperatura global con respecto al año anterior por el cambio climático.

Por otra parte, durante los últimos años se registraron altas temperaturas las cuales repercuten a lo largo del ciclo del dengue.

Nuestra región es constantemente afectada por el dengue, causados por las condiciones del entorno como puede ser justamente la temperatura. Desde el 2009, la primera epidemia a nivel nacional en Argentina, los brotes de dengue se han vuelto un fenómeno estacional y que se expande a más regiones del país. En la Figura 2 puede observarse cómo los contagios han aumentado notoriamente en el 2023 con respecto a 2016 y 2020, con casos en cada más provincias, aunque sigue concentrándose en las regiones del NOA y el NEA, donde las temperaturas son más elevadas durante la mayor parte del año.

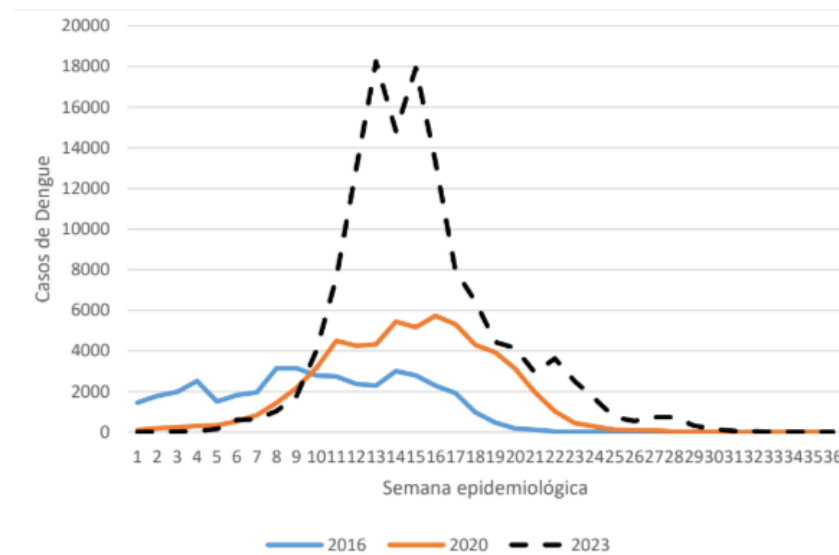


Figura 2. Cantidad de casos registrados de dengue por semana epidemiológica en Argentina, para los años 2016, 2020 y 2023 (hasta la semana epidemiológica 36, del 03/09/2023 al 09/09/2023).

Es por estas razones que es de interés averiguar el comportamiento de la propagación en base a los datos de temperaturas registrados este año.

Se dispone de una investigación previa realizada en esta cátedra la cual cuenta con el modelo del mosquito y con la configuración del simulador para disponer de personas a infectar y charcos en donde se genera el virus. Partiendo de dicho trabajo, se extiende el alcance del simulador agregando la variable de temperatura como factor clave.

Además, cabe destacar que los datos fueron recopilados del repositorio público de datasets del Servicio Meteorológico Nacional.

Procedimiento

El procedimiento que se llevó a cabo durante el proyecto puede resumirse en los siguientes pasos:

- Investigación del dominio
- Obtención de datos sobre la temperatura en La Plata
- Generación de un objeto mosquito usando netlogo el cual interacciona con los datos de entrada y el entorno

- Generar el entorno utilizando netlogo
- Configurar el simulador
 - Para que cada paso se utilice una temperatura diferente siguiendo la secuencia
 - Para recibir los datos de salida
- Ejecución del simulador
- Análisis de los resultados

Para un análisis de la situación fue necesario recopilar datos de cómo el dengue actúa en las condiciones climáticas. La forma de obtener los datos fue mediante la simulación de los agentes propagadores (mosquitos) y la creación de un entorno estándar para la proliferación del dengue teniendo como datos de entrada la temperatura de cada día.

Modelado

Se modelaron tanto la persona como el mosquito teniendo en cuenta el diagrama de flujo de la Figura 3.

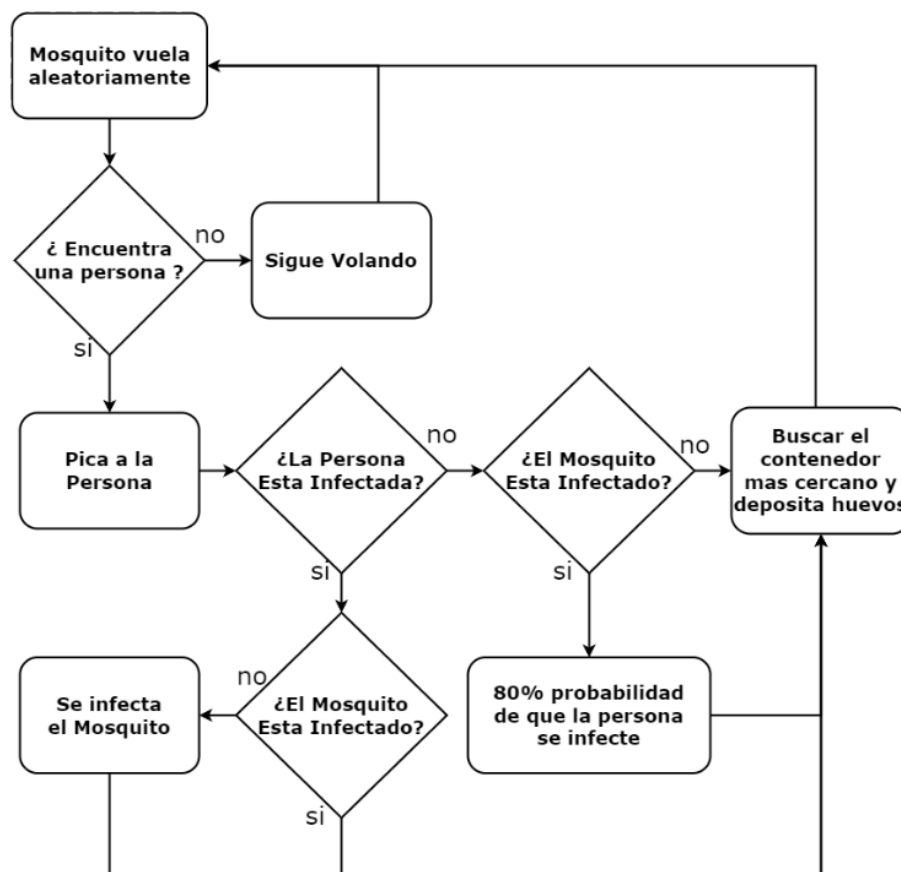


Figura 3. Diagrama de flujo detallando el comportamiento del agente mosquito.

- El mosquito es capaz de infectar a la persona, lo cual se traduce al cambio del estado “color” de la persona

- De la misma forma los mosquitos infectados se diferencian de los sanos por su color en la simulacion, los sanos en amarillo y los infectados con el virus en naranja.

Modelo persona

Para la finalidad de la simulación el agente persona tiene como único objetivo ser picado por mosquitos, por lo tanto puede infectarse de dengue y luego de un tiempo puede curarse.

Una vez curada la persona puede volver a ser infectada.

En una situación real existen diferentes “tipos” de dengue. Una persona al contagiarse y curarse de dicho tipo puede desarrollar inmunidad al mismo, pero por simplicidad de la simulación no se contempla este comportamiento para hacer énfasis en la propagación del virus.

- duracion-de-enfermedad: Es la única variable creada para este agente. Cuando la persona es infectada por un mosquitos con dengue, se actualiza esta variable determinando cuánto tiempo durará la persona con la enfermedad. Según nuestra investigación el virus permanece en la persona entre alrededor de diez días, con lo cual en la simulación la duración de la enfermedad tiene un factor aleatorio haciendo que el tiempo que permanece infectado sea mínimo 7 días y máximo de 14.

Modelo mosquito

Este es el agente más importante, en el cual basamos gran parte de la simulación. Su comportamiento se basa en el diagrama descrito en la figura 3.

El mosquito se desplaza buscando a quien picar constantemente. Cuando lo logra, va al charco más cercano automáticamente a depositar sus huevos, y una vez depositados volverá a salir en busca de otra persona a la que picar.

El virus puede contagiar tanto al mosquito como a la persona, si en la interacción de dichos agentes uno de ellos se encuentra previamente infectado.

Además de los descrito sobre la conducta base del agente mosquito, se agregaron una serie de comportamientos que varían dependiendo de cual sea la temperatura a la que se encuentra la simulación en el instante actual. Los cambios en el ciclo de vida del mosquito, en su comportamiento y en la transmisión del dengue, dependiendo de la temperatura, pueden apreciarse en la Figura 4.

Comportamiento A Cada Temperatura

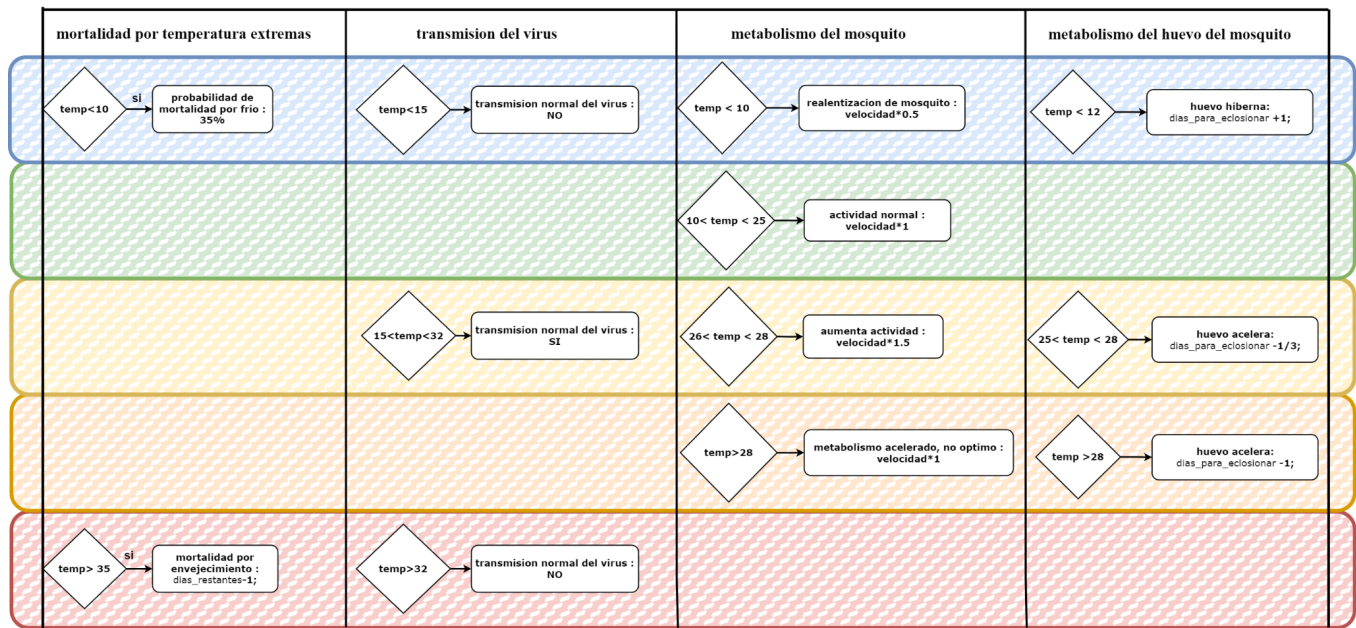


Figura 4. Tabla de comportamiento del agente mosquito en distintas franjas de temperatura

El agente mosquito cuenta con las siguientes variables agregadas:

- ya-pico?: Variable booleana que sirve para cambiar entre los dos accionar del mosquito, si ya picó se tiene que dirigir a un charco a depositar sus huevos, sino sigue buscando a quien picar.
- tick-de-muerte: Al nacer un mosquito se realiza una cuenta de cuánto tiempo es que va a vivir de base un mosquito y se guarda en esta variable. A lo largo de su vida las temperaturas muy altas o muy bajas pueden hacer que esta variable cambie.
- cant-picaduras: Almacena la cantidad de veces que picó un mosquito. En la vida real, un mosquito no pone huevos cada vez que pica, sino que lo hace un máximo de 4 o 5 veces durante su vida (puede picar y no poner huevos). Por eso, limitamos a que el mosquito pique 4 o 5 veces.

Modelo charco

El agente charco es un agente estático al cual los mosquitos se acercan cuando depositan los huevos. Al hacerlo, los huevos hacen eclosión en dicho charco luego de un determinado tiempo.

El charco cambia del color azul al turquesa cuando un mosquito deposita sus huevos, y comienza la etapa de incubación. Vuelve a ser azul cuando los huevos eclosionan para generar nuevos mosquitos adultos.

Los mosquitos infectados pueden pasar el virus a sus crías, por lo que se decidió contemplar dentro de este modelo que los huevos una vez eclosionen pueden hacerlo ya infectados.

Por último la temperatura juega un papel fundamental en la etapa de crecimiento de los mosquitos, ya que a temperaturas altas el tiempo en que los huevos tardan en eclosionar se reduce a la mitad haciendo que potencialmente el virus de dengue se propague más rápido.

Por otro lado, las temperaturas muy bajas no son aptas para que los mosquitos prosperen, por lo que los huevos plantados entran en una especie de hibernación esperando a que la temperatura suba. En nuestra simulación esto se modela actualizando el tiempo en el que nacen los huevos, agregando más tiempo si hay temperaturas bajas y restando cuando aumentan.

Temperatura y tiempo

Para agregarle la variable de temperatura a nuestro entorno buscamos datos reales de la temperatura de cada día a lo largo de un año para alimentar la simulación. Para cada día se encontraba la temperatura máxima y mínima, a la cual le agregamos la temperatura promedio utilizando esas dos.

Cabe decir que el tiempo en nuestra implementación está medido en ticks de simulación, cada tick es considerado un ciclo de simulación, una “vuelta”.

Al intentar emular algo tan complejo como el mundo real, en algún momento se deben hacer concesiones, por lo que optamos por considerar que un tick de simulación es equivalente a 8 hs. de la vida real, es decir, un día equivale a 3 ticks del sistema. Usando esta configuración podemos asignar cómodamente una temperatura lo más cercano a la realidad posible sin tener que comprometer la simulación con alto poder de cómputo.

Comenzando a contar desde las 0 hs. hasta las 8 hs., transcurre el primer tick del día, al cual le asociamos la temperatura mínima. La siguiente franja va desde las 8hs. hasta las 16hs. por lo tanto tiene asignada la temperatura máxima del día. Y por último, la porción del día restante, de las 16 hs. hasta las 0 hs. recibe la temperatura promedio.

A medida que la simulación avance, la temperatura se irá actualizando en consecuencia.

Simulación

Se pasa a explicar brevemente las configuraciones disponibles en la simulación.

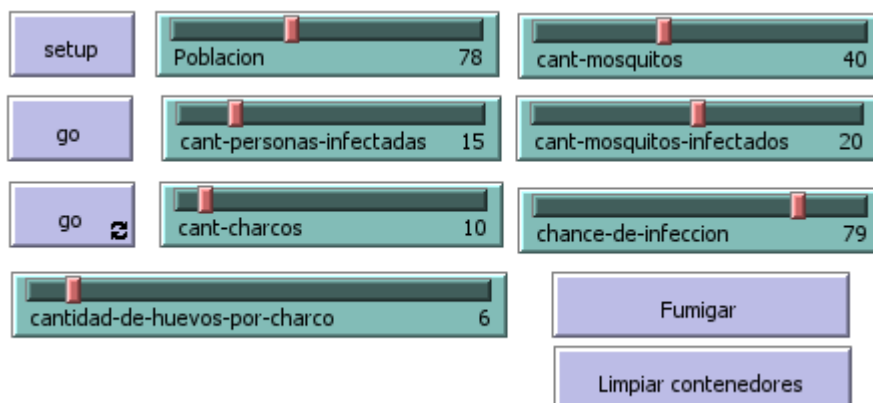



Figura 5. Panel de control de la simulación del modelo en Netlogo.

- **Setup:** crea el escenario de simulación con la configuración actual y la prepara para ejecutar.
- **go:** ejecuta un tick de simulación si se hizo setup previamente.
- **go **: ejecuta la simulación si se hizo setup previamente hasta que termine o se pause.
- **Población:** Cantidad de personas con las que inicia la simulación.
- **cant-mosquitos:** Cantidad de mosquitos con los que inicia la simulación.
- **cant-personas-infectadas:** Cantidad de personas infectadas de la población.
- **cant-mosquitos-infectados:** Cantidad de mosquitos con dengue con los que inicia la simulación.
- **cant-charcos:** Cantidad de charcos con los que inicia la simulación.
- **chance-de-infección:** Probabilidad que tiene una persona sana de contagiarse del virus al ser picada.
- **cantidad-de-huevos-por-charco:** Cantidad de mosquitos que nacerán del charco luego de un tiempo.
- **Fumigar:** Al presionar este botón simula una fumigación a gran escala que mata directamente a un gran porcentaje de la población de mosquitos eligiendolos de forma aleatoria.
- **Limpiar contenedores:** Al presionar este botón todos los charcos de agua que contengan huevos pasan a estar limpios matando así a todos los huevos de mosquito que pudieran estar creciendo.

Las siguientes capturas muestran la simulación en funcionamiento usando datos de temperatura del 2022 y 2023, la configuración de la simulación también se puede apreciar en dichas capturas.

La figura 6 muestra el comienzo de la simulación y cómo la población de mosquitos va aumentando a medida que pasa el tiempo.

Al comenzar con las temperaturas correspondientes a noviembre del 2022 la población de mosquitos se encuentra en el clima ideal para prosperar y procrear más mosquitos, como se puede ver en la gráfica de cantidad de mosquitos, esta sube casi constantemente (a excepción de dos bajadas abruptas consecuencia de temperaturas mínimas muy bajas en el medio del verano) hasta llegar a un techo poblacional, y llegando alrededor de los 500 ticks la población empieza a bajar. Estos primeros 500 ticks de simulación corresponden a parte de la primavera de 2022, verano 2022-23 y el principio del otoño del 2023 donde finalmente comienza a disminuir la población de mosquitos.

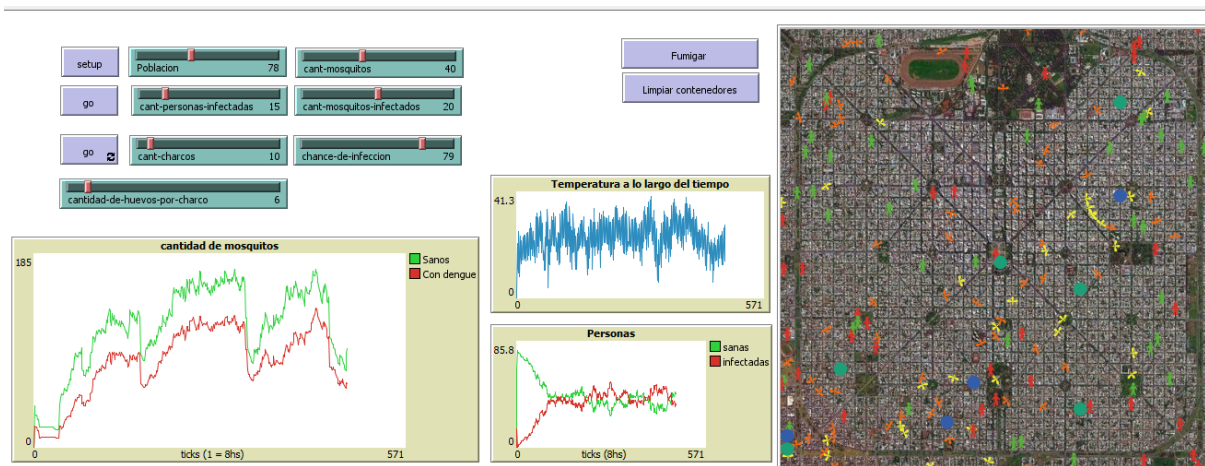


Figura 6. Simulación del modelo hasta el tick 571.

Pasando a la Figura 7 la simulación avanza un poco más hasta llegar al invierno donde la población decae drásticamente. Sin embargo, se puede apreciar que gran parte de los charcos son de color turquesa, por lo que siguen albergando huevos. Sin embargo, al no encontrarse todavía en temperaturas óptimas, los huevos no eclosionan. Por otro lado se puede ver como la gráfica de la temperatura tiende a disminuir y como eventualmente los casos de dengue van menguando hasta desaparecer.

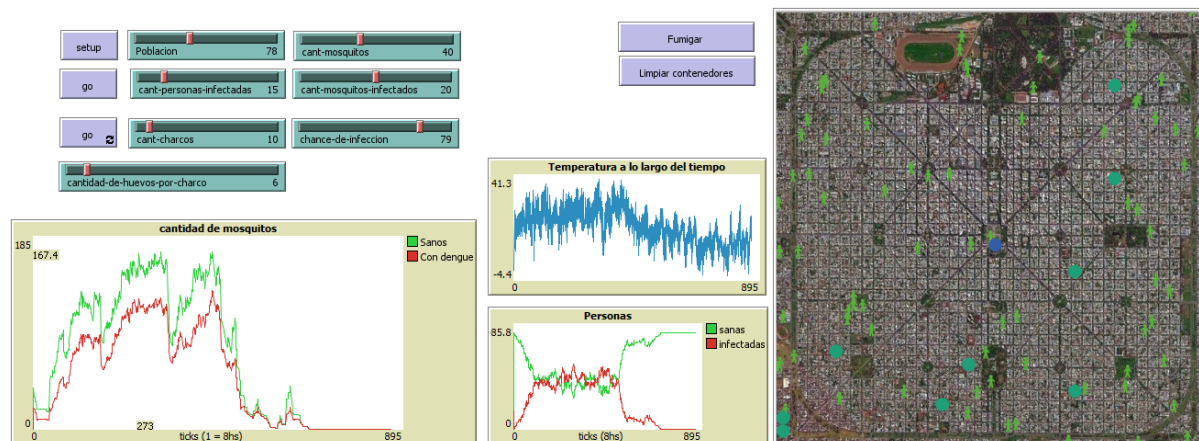


Figura 7. Simulación del modelo hasta el tick 895.

Finalmente en la Figura 8 se aprecia como el ciclo vuelve a comenzar. Los huevos que hibernaban eclosionan cuando comienza la primavera y rápidamente se propagan haciendo que la población y por lo tanto el virus vuelva a alzarse.

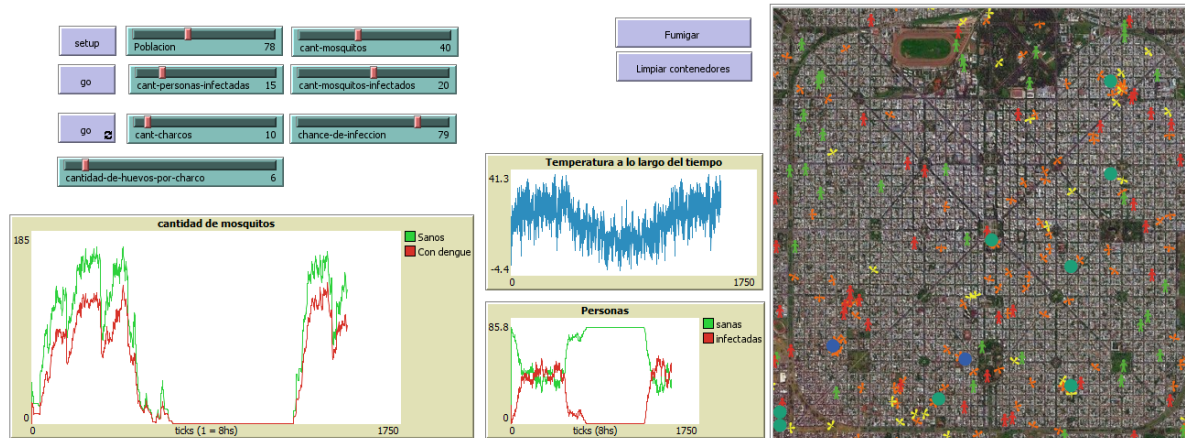


Figura 8. Simulación del modelo hasta el tick 1750.

Al final de este informe se encuentra un link al proyecto de NetLogo junto con los archivos necesarios para ejecutar la simulación.

Resultados

Una vez desarrollado el modelo y adaptado el entorno de simulación Netlogo, se realizaron simulaciones sobre datos recopilados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, por sus siglas) entre el 1° de noviembre de 2022 y el 1° de noviembre de 2023. Por cada día transcurrido, se registraron las temperaturas máximas y mínimas medidas en la estación meteorológica de La Plata, en el Barrio Aeropuerto, de Villa Elvira. Para que la simulación pueda consumirlos, se adaptaron a un archivo de tipo CSV (“comma separated values”), conteniendo 3 columnas: temperatura mínima (“TMIN”), temperatura máxima (“TMAX”) y la temperatura promedio del día (“TPROM”). Este último valor se calculó a partir de la media entre la temperatura máxima y mínima. Por lo tanto, se asignó al primer tick del día la temperatura mínima, al segundo tick la temperatura máxima, y al tercero la temperatura promedio. Se dispone de datos hasta el tick 1098 (3 ticks por cada uno de los 366 días). Una vez alcanzado el tick 1099, se regresa al primer valor (temperatura mínima del 01/11/2022) y se vuelven a recorrer los datos. En las siguientes pruebas, se simulará hasta el tick 2190, para obtener los resultados de una simulación a lo largo de 730 días. Se utilizó una probabilidad de infección del 50% para temperaturas compatibles con la transmisión del virus.

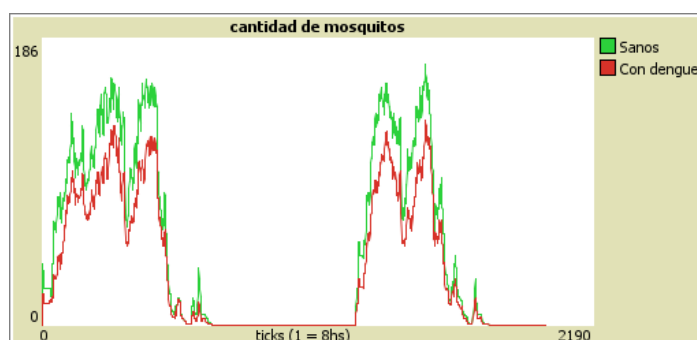


Figura 9. Variación en la población de mosquitos durante la simulación (datos de 2023).

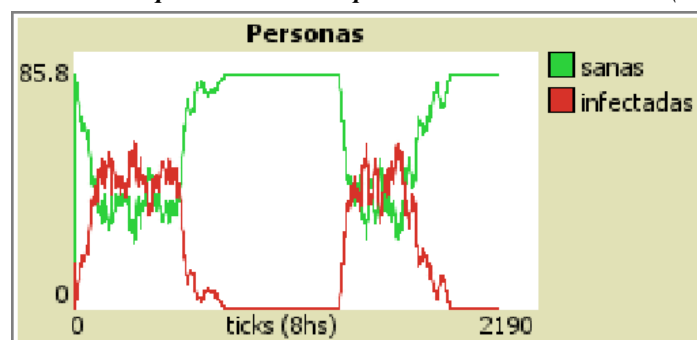


Figura 10. Variación en la salud de la población durante la simulación (datos de 2023).

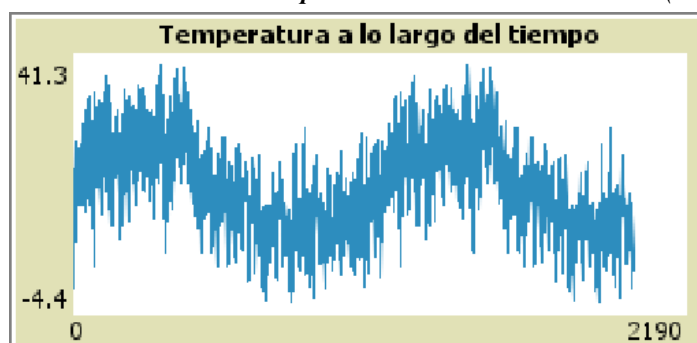


Figura 11. Variación en la temperatura durante la simulación (datos de 2023).

Después, para poder estimar hipotéticamente el impacto del aumento de las temperaturas debido al cambio climático, se aumentaron los datos TMIN y TMAX de forma aleatoria, entre 0 y 1°C cada día, utilizando un script en el entorno de análisis numérico Octave. En el mismo script se informó la cantidad de días que igualaron o superaron los 32°C, los que igualaron o estuvieron por debajo de los 0°C, y la temperatura promedio (Figura 12).

```

Dias donde la temperatura maxima fue >=32°C:
21

Dias donde la temperatura minima fue <=0°C:
8

Temperatura promedio:
17.6649

Dias donde la temperatura maxima fue >=32°C:
23

Dias donde la temperatura minima fue <=0°C:
4

Temperatura promedio:
18.1652

```

Figura 12. Datos obtenidos del script de Octave al generar el archivo con temperaturas diarias hipotéticas para el 2024.

Como puede observarse, se generó una tabla de datos de temperaturas diarios para representar un aumento en la temperatura media anual de 0.5°C.

También se generaron datos para un aumento de temperatura hipotético con respecto a 2023 de entre 0 a 2°C por día para 2025 (Figura 13), y de 0°C a 7°C para 2030 (Figura 14).

```

Dias donde la temperatura maxima fue >=32°C:
26

Dias donde la temperatura minima fue <=0°C:
3

Temperatura promedio:
18.6624

```

Figura 13. Datos obtenidos del script de Octave al generar el archivo con temperaturas diarias hipotéticas para el 2025.

```

Dias donde la temperatura maxima fue >=32°C:
58

Dias donde la temperatura minima fue <=0°C:
1

Temperatura promedio:
21.2366

```

Figura 14. Datos obtenidos del script de Octave al generar el archivo con temperaturas diarias hipotéticas para el 2030.

Así, se podrían simular escenarios en los cuales, para 2025, la temperatura media anual hubiese aumentado en aproximadamente 1°C, y en 2030 hasta más de 3.5°C.

A partir de estos datos, se obtuvieron los siguientes gráficos.

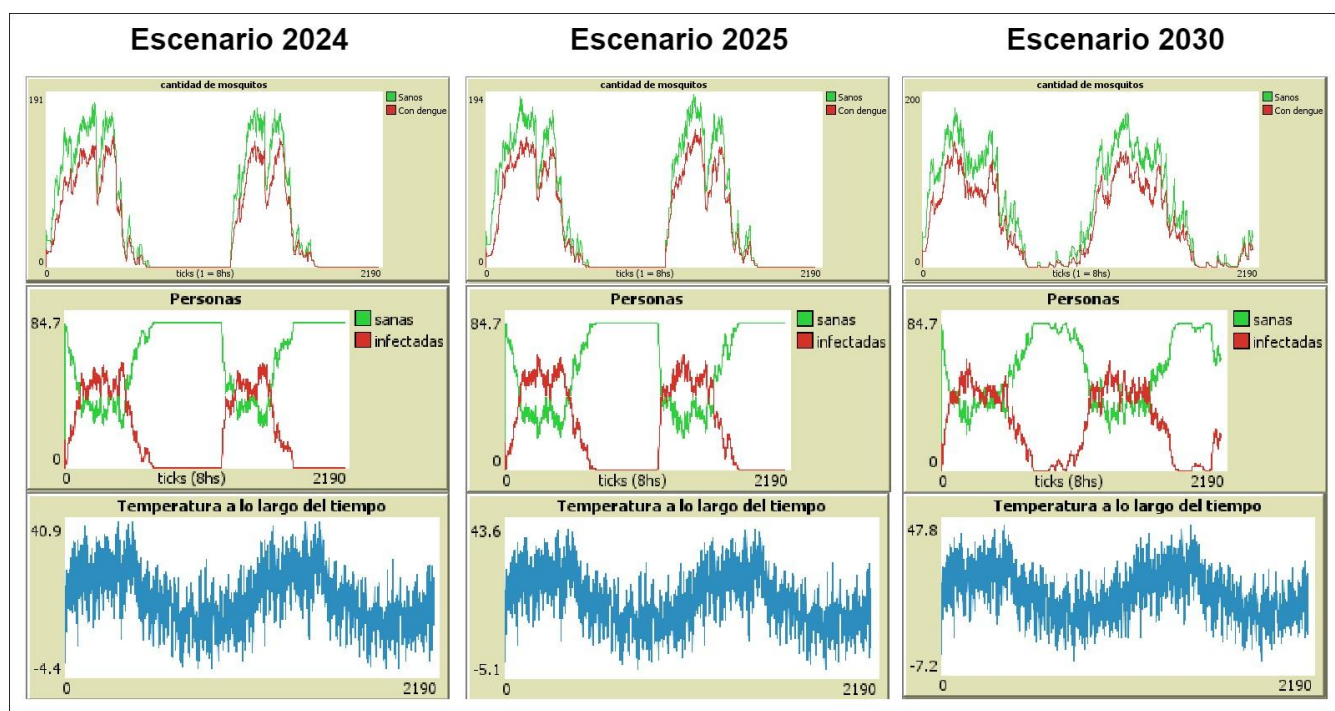


Figura 15. Gráficos de los resultados de las simulaciones sobre datos hipotéticos de temperatura en La Plata para 2024, 2025 y 2030.

Puede verse en las gráficas de la primera fila como la población total de mosquitos alcanza picos cada vez más altos: de 186 en 2023 a 191 en 2024, 194 en 2025 y 200 en 2030. Los cambios en el metabolismo del mosquito, debidos al aumento en la temperatura, pueden explicar este crecimiento en el máximo como en la supervivencia de ejemplares adultos: entre 2024 y 2030 la curva de población se va ensanchando, significando que es mayor la cantidad de días en los que hay mosquitos adultos vivos.

En la segunda fila, se puede apreciar que la cantidad de infectados en 2025 alcanza dos picos que superan a los de 2024, además de ser mayor la cantidad de días en los cuales la población infectada es mayor a la sana. En 2030 se registran casos durante casi todo el año, en contraste con los períodos sin casos en años anteriores, y la curva de infectados en la época de mayor infección se ve ensanchada de forma pronunciada.

En la tercer fila es notorio cómo van aumentando progresivamente tanto las temperaturas máximas como las mínimas, pasando de un máximo de 40.9 °C en 2024 a uno de 43.6°C en 2025 y de 47.8°C en 2030; y de un mínimo de -4.4°C en 2024 a uno de -5.1°C en 2025 y -7.2°C en 2030.

Conclusiones

A partir de un modelo del ciclo de vida del mosquito *Aedes Aegypti* y sus hábitos de transmisión del virus del dengue, es posible desarrollar una simulación por agentes que reciba datos reales del Servicio Meteorológico Nacional para La Plata y obtener una aproximación de cómo factores ambientales impactarían en la dinámica epidemiológica del dengue. No se tuvo en cuenta un crecimiento poblacional ni de mosquitos ni de humanos, sino que ambas se mantienen estables durante las simulaciones.

El aumento sostenido de la temperatura media anual tiene los siguientes efectos:

- Un aumento en la población total de mosquitos en la temporada de mayor temperatura
- Una distribución más extensa de la actividad de los mosquitos durante el año
- Un aumento en la cantidad total de casos de dengue simultáneos en los períodos de mayor temperatura, con picos cada vez más altos
- Una distribución más extensa en la cantidad de casos de dengue en el año, volviéndose más frecuentes las infecciones fuera de la temporada de verano

El registro de temperaturas récord, tanto a nivel anual como estacional, implica que los brotes se volverán más frecuentes y pasarán a producirse en regiones geográficas donde antes eran infrecuentes, tales como el partido de La Plata. Estas tendencias, que podrán observarse debido al cambio climático, deberán ser abordadas tanto con políticas medioambientales, para atenuar y controlar el factor antropológico en el cambio climático, como con políticas sanitarias, para disminuir su impacto sobre el sistema de salud y la calidad de vida de las generaciones futuras.

Bibliografía

- [1] Barros, Vicente & Boninsegna, José & Camilloni, Ines & Chidiak, Martina & Magrín, Graciela & Rusticucci, Matilde. (2015). "Climate change in Argentina: Trends, projections, impacts and adaptation". Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change. 151-169. 10.1002/wcc.316.
- [2] Chin, Pamela & Ehrbar, Dylan & Micieli, María & Fonseca, Dina & Ciota, Alexander & Kramer, Laura. (2018). "Differential Effects of Temperature and Mosquito Genetics Determine Transmissibility of Arboviruses by Aedes Aegypti in Argentina". The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. 99. 10.4269/ajtmh.18-0097.
- [3] Dirección de Epidemiología, Ministerio de Salud de la República Argentina. (2023). "Vigilancia de dengue y otros arbovirus". Boletín Epidemiológico Nacional N°669, SE 36, Año 2023. págs. 13-23. Disponible en (consultado el 13/12/2023): <https://bancos.salud.gob.ar/recurso/boletin-epidemiologico-nacional-n-669-se-36-2023>
- [4] López MS, Gómez AA, Müller GV, Walker E, Robert MA, Estallo EL. (2023). "Relationship between Climate Variables and Dengue Incidence in Argentina". Environ Health Perspect. 2023 May;131(5):57008. doi: 10.1289/EHP11616. Epub 2023 May 24. PMID: 37224070; PMCID: PMC10208431.
- [5] Naish, Sue & Dale, Pat & Mackenzie, John & McBride, William & Mengersen, Kerrie & Tong, Shilu. (2014). "Climate change and dengue: A critical and systematic review of quantitative modelling approaches". BMC infectious diseases. 14. 167. 10.1186/1471-2334-14-167.
- [6] Organización de las Naciones Unidas. "¿Qué es el cambio climático?". Consultado el 13 de diciembre de 2023. Disponible en: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>

[7] Robert, Michael & Stewart Ibarra, Anna & Estallo, Elizabet. (2020). "Climate change and viral emergence: evidence from Aedes-borne arboviruses". Current Opinion in Virology. 40. 41-47. 10.1016/j.coviro.2020.05.001.

A continuación se encuentra un enlace a Google Drive con una carpeta con los documentos bibliográficos utilizados a lo largo del desarrollo del proyecto, además de un video a modo de demostración de la simulación:

<https://drive.google.com/drive/folders/1cmqz5ZfQG4L2VOB3F6YUtFCpWUbBJLk8?usp=sharing>

Código

El siguiente enlace redirecciona también a otra carpeta donde se encuentran todos los archivos necesarios para correr la simulación junto con el proyecto de NetLogo:

https://drive.google.com/drive/folders/1e46_KnTM9DQm_L-2srdTPImPfleoP7Ke?usp=sharing