

SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL DENGUE EN VILLAVICENCIO, DURANTE UNA TEMPORADA DE SEQUÍA Y ESCASEZ DE AGUA

Adrián Camilo González 160003510 and Juan Sebastián Lozano 160003518

Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos
Km 12 Vía Puerto López, Villavicencio, Colombia
{adrian.gonzalez, juan.lozano.garzon}@unillanos.edu.co
<http://www.unillanos.edu.co>

Resumen En Colombia cerca de 25 millones de personas que habitan en zonas urbanas con transmisión endémica de dengue están en riesgo de adquirir esta enfermedad. El dengue es una enfermedad viral común en zonas tropicales y subtropicales transmitida por mosquitos del género *Aedes*. El virus es transmitido a los humanos por la picadura de un mosquito hembra infectado. Ya que no existen vacunas que protejan contra la infección, el control de la enfermedad se hace controlando la población adulta o inmadura del mosquito [1].

La salud en Colombia no es reconocida por ser muy eficiente, al contrario, esta presenta una crisis que se ha mantenido en los últimos años. Villavicencio es uno de los municipios que se ha visto afectado por esta crisis, los centros hospitalarios están en una emergencia funcional. Además, se ha venido presentando un crecimiento en los casos de dengue, lo cual es preocupante debido a la crisis en la salud ya que los centros de salud no podrían responder como es debido ante esta emergencia.

Es en este escenario donde se desea implementar una herramienta de simulación en la que se tomen en cuenta algunas variables que permitan analizar el comportamiento de la epidemia (dengue) y de esta manera, con los resultados obtenidos se facilite la toma de decisiones frente a las medidas para poder controlar efectivamente la enfermedad.

Para ello se hará uso del modelo epidemiológico (SIR), donde como primera medida se hará una recolección de datos e información proveniente de artículos y reportes de salud sobre casos de dengue que se hayan presentado en la ciudad de Villavicencio primordialmente, ya que es la ciudad que se tomará como objeto de estudio. Se implementará el modelo a usar con las variables ya definidas. Después se harán las respectivas reuniones con los expertos en el tema para la evaluación del modelo, seguido a esto se realizarán las primeras simulaciones, el modelo será ajustado para obtener la simulación más acorde a los datos recolectados y poder realizar una mejor predicción en el tiempo del comportamiento de la enfermedad.

Keywords: Dengue, *Aedes Aegypti*, sequía, enfermedad, infección, Villavicencio

1. Formular el problema

1.1. Definición del problema

En las sequías, las personas acumulan más agua dentro de sus casas, por lo que, al dejarlas sin protección, facilita la reproducción del mosquito transmisor. Por ello, enfermedades como el dengue pueden proliferar en la ciudad. En Villavicencio la población fue de 503 414 habitantes en 2018. Se busca realizar una simulación de 6 meses en las cuales se toma en cuenta principalmente la concentración de la población de la ciudad, ya que es una variable que influye directamente a la población del mosquito, así como también el tiempo de vida del mosquito, su reproducción, y los porcentajes de infección, presentados en estudios epidemiológicos promulgados por el Instituto Nacional de Salud y la Secretaria de Salud del Meta, para así ver el comportamiento de la enfermedad.

1.2. Objetivos

Objetivo General El objetivo principal del proyecto es el análisis mediante el ejercicio de simulación siguiendo un modelo epidemiológico, para determinar el comportamiento del dengue en un período de tiempo en la ciudad de Villavicencio.

Objetivos específicos

- Demostrar la influencia de determinadas condiciones climáticas en la proliferación de la enfermedad.
- Analizar el proceso y los resultados de las simulaciones y determinar si los centros de salud tienen la capacidad de atender los casos de dengue.
- Facilitar la toma de decisiones a los entes encargados de la salud tras el análisis de los resultados obtenidos de la simulación.

1.3. Preguntas específicas a ser respondidas por el estudio de simulación

1. ¿Qué sucede si hay un aumento de la población debido al turismo, migración venezolana o algún otro factor?
2. ¿Cómo influye el clima en la población de los mosquitos?
3. ¿Están las diferentes entidades de salud preparadas para combatir el aumento del dengue en la población en una temporada de escasez de agua?

1.4. Medidas de desempeño

- Tasa de nacimiento
- Tasa de incidencia
- Tasa de contagio
- Tasa de recuperación
- Tasa de mortalidad per cápita

2. Recolectar información/Datos y Construir un modelo conceptual

2.1. Recolección de los datos y simulación

Los datos y variables necesarias para la simulación fueron recolectados principalmente de los informes epidemiológicos brindados por la Secretaria de Salud de Villavicencio, así como otros estudios para modelar la epidemia del dengue, artículos de revistas que ilustran como es el comportamiento de una infección, en especial del dengue, y que variables se toman en cuenta, así como otros estudios realizados [6] [3] [5]. Así pues, las variables de referencia se logran establecer en base a estos estudios y textos investigativos que impliquen el modelado de una infección como el dengue, e informes de la ciudad de Villavicencio [5]. Para poder tener un mejor manejo de los datos, se utilizará una escala menor de la población, lo que significa que los valores de población y los resultados se multiplicaran por un factor de 1000.

Un aspecto a tomar en cuenta es que el tiempo de incubación es despreciable: Un susceptible que ha sido infectado, se considera inmediatamente infeccioso. El modelo supone que todos los individuos tienen las mismas probabilidades de contagiarse en el mismo ejercicio, pero dicho valor se irá cambiando, para poder ver cómo cambian los resultados en los distintos escenarios planteados con diferentes características, así como las otras variables en caso de referenciar un cambio en el funcionamiento del sistema. Algunos de estos documentos tenían valores ya establecidos, por lo que fueron utilizados como eje principal para la simulación.

Así, luego de analizar varios de los documentos, fue posible determinar los valores de las variables para la primera simulación del escenario en Villavicencio:

- Tasa de nacimiento = 0.02. [3]
- Tasa de mortalidad per cápita = 0.1
- Tasa de incidencia = 0.02705. [5]
- Tasa de contagio = 0.33
- Tasa de recuperación = 0.7

Las ecuaciones resultantes son:

$$\frac{dS}{dt} = 1.2(S + I + R) + (0.02705 * R) - 0.33 * S * I - S * 0.1$$

$$\frac{dI}{dt} = 0.33 * S * I - I * 1.33$$

$$\frac{dR}{dt} = I * 1.2 - R * 0.1$$

Con los valores iniciales:

$$S(0) = 150, I(0) = 170, R(0) = 20$$

Se procede a simular el ambiente establecido.

2.2. Modelo Conceptual

Alcance del modelo

Con la información adecuada, podría realizarse la simulación en cualquier ciudad de Colombia, siempre que se cuenten con datos confirmados por instituciones oficiales. Inicialmente la simulación se realizará teniendo en cuenta solo la población de Villavicencio.

Ya que la enfermedad del dengue solo es transmitida por las hembras, las cuales viven más que los machos, su población siempre será mayor, por lo que asumimos que el 60 % de los huevos depositados se convertirán en hembras. Además, que lograrán vivir 3 semanas.

Entre más población presente un área de la ciudad, mayor será la cantidad de agua en sus hogares, lo que aumenta la reproducción del mosquito.

Configuraciones del sistema

Para otros posibles sistemas se podrían añadir otros factores de riesgo ambientales como el clima, la temperatura, la humedad y factores sociales como, la densidad de la población, patrones de asentamiento, la clasificación de la población por edad o sexo, así como su grado de inmunidad. Sin embargo, solo se tomaron en consideración la población de las personas, ya que en países latinoamericanos como Colombia, el mosquito *Aedes Aegypti* tiene una gran presencia, por ello es necesario analizar el comportamiento del dengue, que representa un gran riesgo para la salud humana.

Ventana de tiempo

Una vez definidas las fases del proyecto y sus respectivas tareas, se procedió a crear el marco de tiempo para el desarrollo durante el semestre:

FASE	N.	Actividad	Mayo				Junio				Julio				Agosto	
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Definición del problema	1	Reunión de inicio de proyecto	■	■												
	2	Definir objetivos generales		■	■											
	3	Definir preguntar por responder			■	■										
	4	Definir medidas de rendimiento				■	■									
	5	Definir alcance del modelo					■	■								
	6	Definir configuraciones del sistema						■	■							
	7	Definir ventana de tiempo							■	■						
Recolección de datos y diseño del modelo	8	Recolectar datos							■	■						
	9	Realizar modelo								■	■					
Desarrollo y validación del modelo	10	Definir nivel de detalle del modelo									■	■				
	11	Entrega y validación del modelo										■	■			
Pruebas	12	Corrección del modelo											■	■		
	13	Primeras pruebas												■	■	
Resultados	14	Análisis de las pruebas de simulación													■	■
	15	Documentación de resultados														■
	16	Entrega de resultados														■

Figura 1. Cronograma de actividades.

Modelo epidemiológico SIR con tasas de flujo

Para este proyecto, fue necesario consultar diferentes fuentes de cómo se da la expansión epidemiológica de una enfermedad, para así modelar su comportamiento, y uno de estos es el modelo epidemiológico SIR, el cual es un modelo dinámico de sistemas, un modelo que representa los brotes epidémicos. Este se encuentra planteado ecuaciones diferenciales para describir, explicar y predecir el comportamiento de agentes infecciosos y potencialmente dañinos a poblaciones humanas o animales a lo largo del tiempo. [1] Sus siglas significan 3 clases de agrupación de los individuos según su interacción en el sistema, de modo que la población humana, una persona puede pasar por todos o algunos de los siguientes estados:

- S: Susceptibles, aquellos que no han enfermado anteriormente y por lo tanto pueden resultar infectados al entrar en contacto con la enfermedad.
- I: Infectados: Aquellos en condiciones de transmitir la enfermedad a los del grupo S.
- R: Recuperados de la enfermedad, y que ya no están en condiciones ni de enfermar nuevamente ni de transmitir la enfermedad a otros.

Según el modelo SIR, un individuo susceptible (S) en contacto con un infectado (I), tiene cierta probabilidad de convertirse él mismo a la condición de infectado. [3]

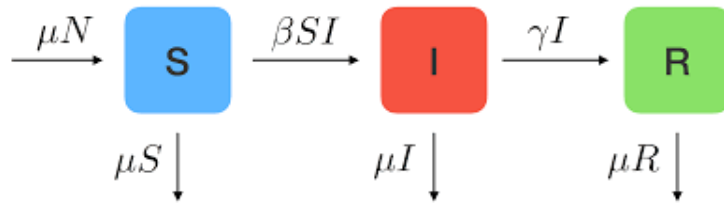


Figura 2. Variables del modelo

Las variables que son tomadas en cuenta son las tasas de contagio y de recuperación. Sin embargo, ya que es posible que la persona llegue a reincidir en contagio, también se utiliza una tasa de incidencia. Como el objetivo de la simulación es que la población que ingresa al sistema aumenta durante un periodo, se crea un flujo que entra a nivel de susceptibles, de modo que hay una constante renovación de individuos susceptibles a la enfermedad, ligada a una tasa de nacimiento que se utiliza para simular el aumento. [2] Por otra parte, la capacidad de infectar susceptibles no se mantiene siempre, sino que desaparece al cabo de cierto tiempo, lo que puede ocurrir por diferentes mecanismos como la recuperación de la enfermedad o muerte por esta, resultando en la salida del sistema de dichos individuos, ligada a una tasa de muerte per cápita establecida. Este

modelo toma su nombre (SIR) del esquema que lo representa: En las ecuaciones cada símbolo representa [5]:

Símbolo	Variable
S	Susceptibles
I	Enfermos
R	Recuperados
β	Tasa de contagio
μ	Tasa de mortalidad per cápita
γ	Tasa de recuperación
TI	Tasa de incidencia
λ	Tasa de nacimiento

Tabla 1. Símbolos en la ecuación del modelo

Las ecuaciones definidas para este caso resultan en:

- Población de susceptibles:

$$\frac{dS}{dt} = \lambda(S + I + R) + (TI * R) - \beta * S * I - S * \mu$$

- Población de Infectados:

$$\frac{dI}{dt} = \beta * S * I - I(\gamma + \mu)$$

- Población de Recuperados:

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

La derivada del estado susceptible es siempre no positiva, por lo que el número de individuos susceptibles disminuirá mientras existan individuos infecciosos. Sin embargo, la derivada del estado resistente es siempre no negativa, provocando que el número de recuperados aumente mientras existan individuos infecciosos. [6]

Otro aspecto a considerar es el ritmo básico de reproducción o R_0 , el cual es un valor que indica un umbral para que la epidemia pueda prosperar en un ambiente, o finalmente desaparezca. Para el sistema SIR se define como:

$$\frac{\beta}{\gamma + \mu}$$

Si la tasa de contagio excede a la de recuperación (es decir, $R_0 > 1$), el número de infectados aumenta y habrá una pandemia dentro del ambiente $\frac{dI}{dt} > 0$ cuando t tiende a infinito, de lo contrario la enfermedad merma o desaparece. [4]

El R_0 es un parámetro importante para medir la dinámica de la enfermedad porque a partir del umbral se puede indicar cuándo podría ocurrir un brote y de ser necesario medidas de prevención y contención. Por ejemplo, el objetivo de toda respuesta de salud pública durante una pandemia de gripe consiste en aminorar o detener la propagación del virus mediante estrategias de mitigación que:

- Disminuir el R_0 mediante el cambio de la tasa de transmisión (por ejemplo, cerrando las escuelas) o de la duración de la infección (por ejemplo, mediante el uso de antivíricos)
- Disminuir el número de individuos susceptibles (por ejemplo, mediante la vacunación).

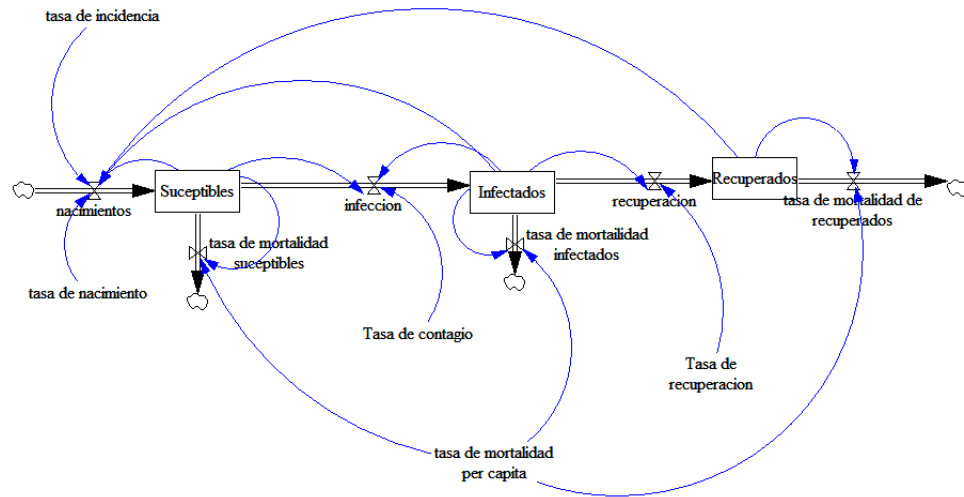


Figura 3. Diagrama del sistema

Diagrama general del diseño del sistema actual y/o diagrama de flujo de procesos

Parámetros del modelo

NIVELES

- Susceptibles
- Infectados
- Recuperados

VARIABLES

- Tasa de nacimiento
- Tasa de mortalidad
- Tasa de incidencia
- Tasa de recuperación

CANALES DE FLUJO

- Nacimientos
- Infección
- Recuperación
- Tasa de mortalidad para cada grupo

Especificaciones técnicas del computador

- Procesador i5 cuarta generación
- 16 GB de memoria RAM
- Disco SSD 240Gb + HDD 1TB
- Nvidia Geforce GTX 970 4GB

Restricciones de tiempo y dinero

Para modelar el sistema fue necesaria la ayuda de maestros de biología que brindaran una conceptualización de cómo se comporta una enfermedad epidemiológica dentro de una población, aclarando aspectos de la propagación, infección y curación, y recomendar las variables que representan mejor dicho comportamiento para la toma de decisiones, cuyos valores pueden obtenerse gracias a boletines informativos de la secretaria de salud de Villavicencio, y referenciados en otros ejercicios de modelado para la infección del dengue.

El computador destinado posee capacidades altas, por lo que se espera una facilidad para ejecutar los cálculos, y así tener un mejor resultado de los valores que se presentan. Se espera obtener que los resultados iniciales coincidan con los presentados en algunos de los boletines, puesto que algunas variables tendrán cambios, para simular el mismo sistema bajo diferentes restricciones.

3. Validación del Modelo Conceptual

Para validar si los resultados obtenidos con la simulación, tienen sentido con la información recolectada tras documentarnos y con los datos proporcionados por el tomador de decisiones, este último revisó el sistema simulado para dar sus observaciones. La profesora Lilia Mercedes Ladino, directora del grupo de investigación en Sistemas dinámicos nos dio el visto bueno para el modelo que se diseñó e implementó en vensim, nos recomendó buscar la combinación de variables que nos produzca resultados similares a los reportes de casos de dengue a través del tiempo y así obtener una mejor predicción.

4. Programar el modelo

4.1. Software de simulación seleccionado

El software escogido para realizar la simulación es Vensim, el cual se ajusta para la tarea, ya que es una herramienta visual de modelaje que permite simular, analizar, plantear y optimizar modelos de dinámica de sistemas mediante diagramas de flujo o Forrester.

El programa tiene como función principal es crear modelos de simulación con diagramas de influencias, y en el modelo SIR la población se divide en 3 tipos, que fluyen en la secuencia *Susceptibles* > *Infectados* > *Recuperados*, y esta simulación se enfoca en el crecimiento de estos.

En la interfaz se pueden usar diferentes utilidades, como las variables fijas que pasan como parámetro, los "Niveles", que muestran en cada instante es estado de las poblaciones, presentan una acumulación y varían solo en función de otros elementos definidos en un flujo que entra y sale de este. Como son ecuaciones diferenciales, cada flujo tiene entradas y salidas a cada nivel, describiendo su comportamiento. Una vez que se han asignado, es necesario ajustar los tiempos y saltos para realizar la simulación.

Algunas características destacables de Vensim son:

- Permite identificar los elementos del modelo con nombres de hasta 250 caracteres, incluyendo tantos espacios en blanco, como se desee.
- Permite introducir datos directamente o en forma de tablas e interpola los datos conocidos cuando se omiten los valores de alguna(s) observación(es).
- El modelador podrá realizar simulaciones con los datos de partida del modelo empleando la opción simulate del menú desplegable Model. Seleccionando la opción adecuada también podrá realizar simulaciones alternativas modificando el valor de los parámetros o valores de cuadros o tablas del modelo.
- Puede indicar si la sintaxis de las ecuaciones y variables utilizadas presentan un error, así como las variables que entran al nivel se espera que sean utilizadas, y las que no, útil para verificar si hay un error en el planteamiento del sistema.
- La apariencia de la pantalla del diagrama causal es muy flexible, en el sentido de que resulta muy sencillo organizar visualmente los elementos por categorías asignándoles bordes o marcos diferentes, desplazándolos por la pantalla a conveniencia, modificando las fuentes que los describen, el grosor, color de las flechas que indican sus relaciones, etc.
- El último icono del menú vertical permite leer la evolución de la variable seleccionada periodo tras periodo en forma de cuadro.

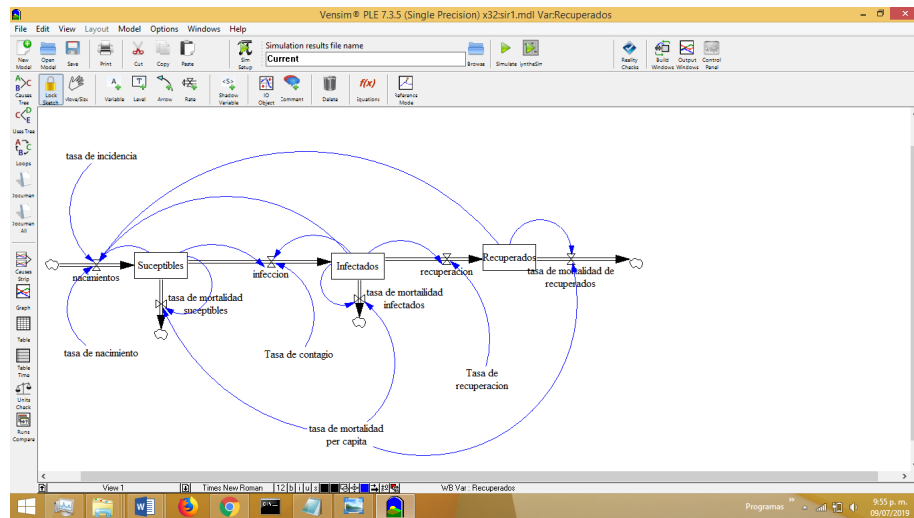


Figura 4. Interfaz de Vensim [7]

Se han analizado algunos ejemplos del modelo SIR, en el cual se toman en cuenta variables como la duración de la enfermedad.

4.2. Implementación del modelo en el lenguaje o software de simulación

Se ha modelado el sistema para la simulación de la transmisión del dengue, principalmente los niveles que demuestran el flujo de la población entre los estados de susceptible, Infectado y Recuperado, los cuales cuentan con tasas de nacimiento y muerte.

Para la población susceptibles, entra un canal de flujo que son los nacimientos que se presentan, ya que la población aumentara conforme al tiempo.

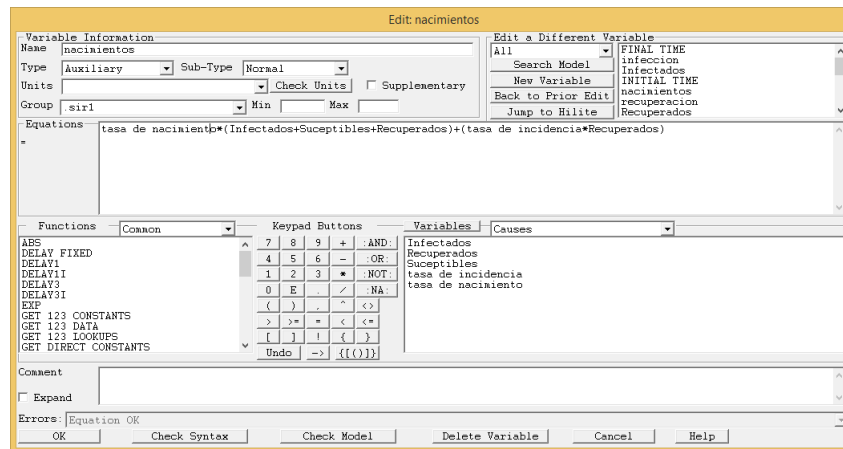


Figura 5. Panel de ecuaciones de Vensim

De la población Susceptibles salen 2 canales que representa la salida de personas que han muerto del modelo, según una tasa de muerte determinada por la información y estudios que se han revisados. Y un flujo que representa el que una persona susceptible contraiga la enfermedad llamado infección. Los infectados influyen por el posible contacto con estos.

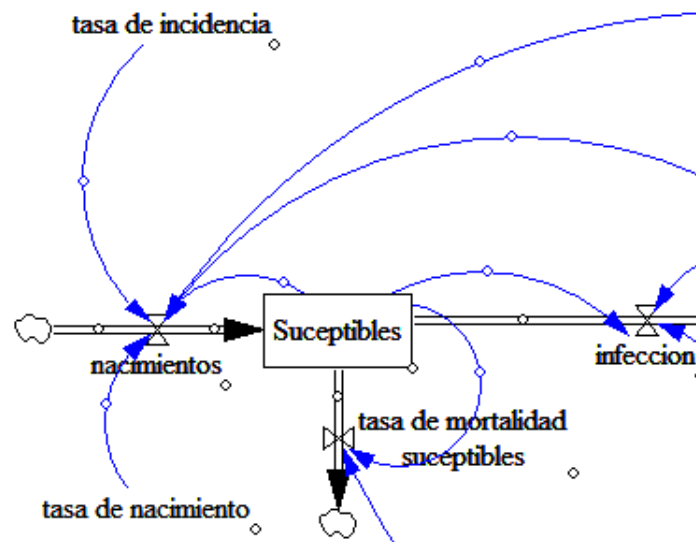


Figura 6. Modelado epidemiológico para Susceptibles

Para los infectados entra el flujo de infección. Y 2 flujos de salida, uno que sale representando a las muertes de personas susceptibles. Y otro que representa la recuperación de los infectados. Este entra al siguiente nivel de los recuperados.

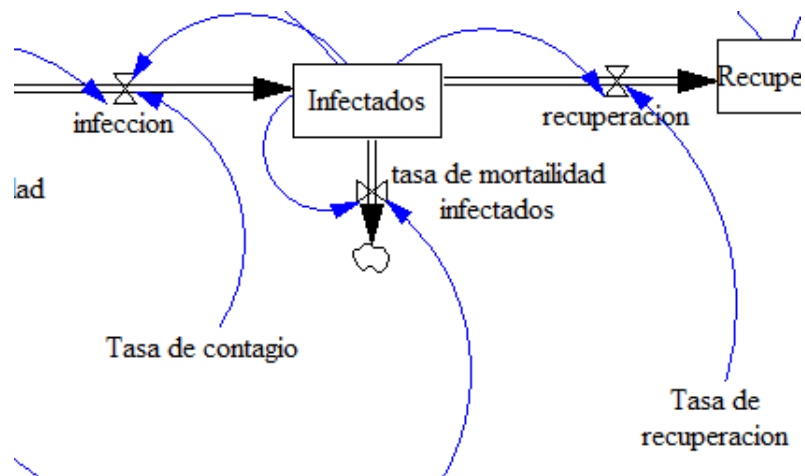


Figura 7. Modelado epidemiológico para Infectados

Al nivel de Recuperados entra el flujo de recuperación. Y sale 1 flujo que representa la muerte de los recuperados, usualmente natural.

Al ser un sistema de ecuaciones diferenciales, los flujos que entran generalmente representan una adición, mientras que los que salen representan sustracción, así que cada nivel se realiza sumas y restas, cuyos valores dependen de las variables que incluyen en los valores de flujo:

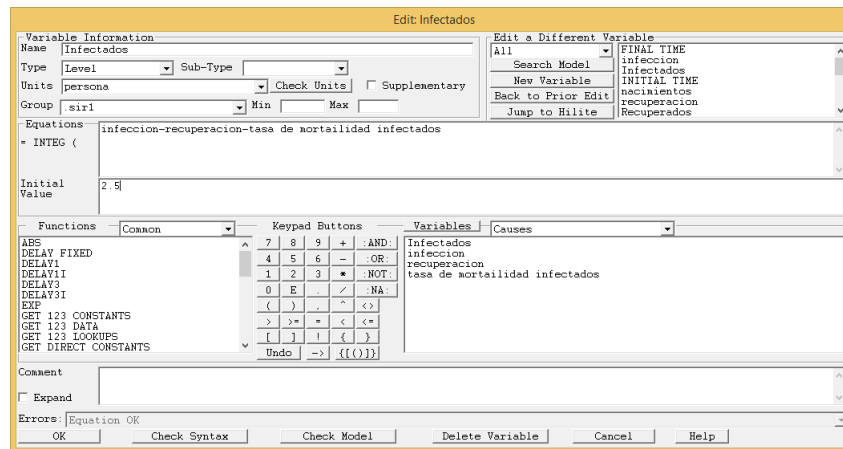


Figura 8. Panel de edición infectados

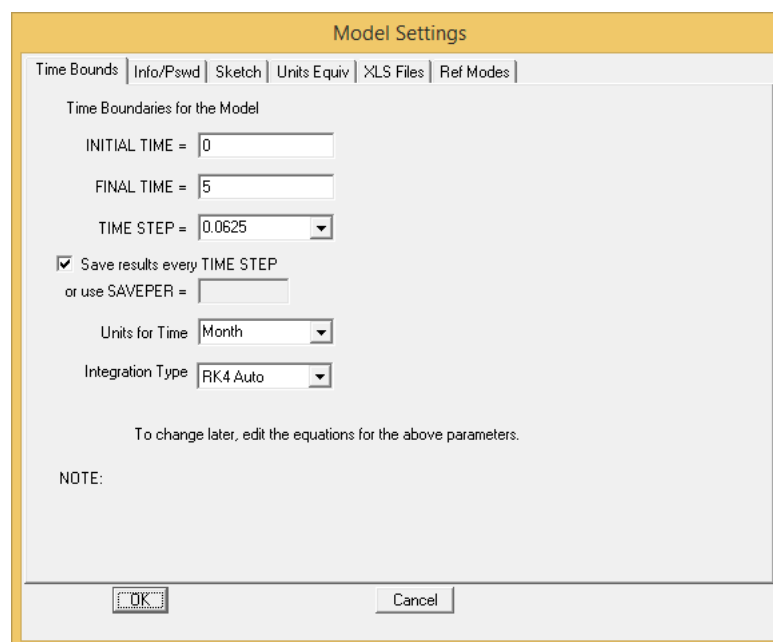


Figura 9. Configuraciones del modelo

Durante la ejecución es posible escoger el método de integración adecuado para la simulación, en este caso el de Runge-Kutta para resolver las ecuaciones

diferenciales.

Se acomodan los tiempos de la simulación y saltos para realizar, que entre más bajo sea su valor más preciso serán sus cálculos.

En algunas ocasiones durante los cálculos se presentaban errores cuando un número se hacía demasiado grande, por lo que fue necesario ajustar los saltos adecuados, o por las unidades utilizadas, que deben generalizarse.

En las primeras pruebas se obtuvieron las primeras curvas, que reflejaban las poblaciones, para verlas, se seleccionan los 3 niveles y se da la opción de gráfico:

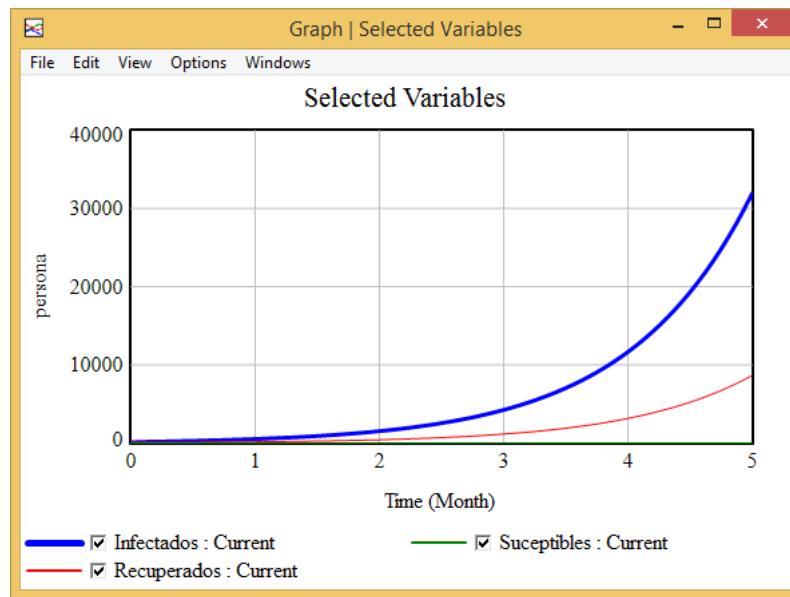


Figura 10. Gráfico del comportamiento del modelo epidemiológico del dengue

5. ¿Es el modelo programado válido?

Después de haber recolectado información de distintas fuentes, se probó el modelo usando estos datos de tal manera que las configuraciones que producen un número básico de reproducción como resultado de la fórmula coincidan y tengan sentido con su gráfica correspondiente de acuerdo si este es mayor o menor a 1. Los resultados finalmente fueron presentados a la profesora Lilia Mercedes Ladino confirmando la validez del modelo.

6. Diseñar, Realizar, y Analizar los Experimentos de Simulación

Escenario 1: Simulación actual de Villavicencio

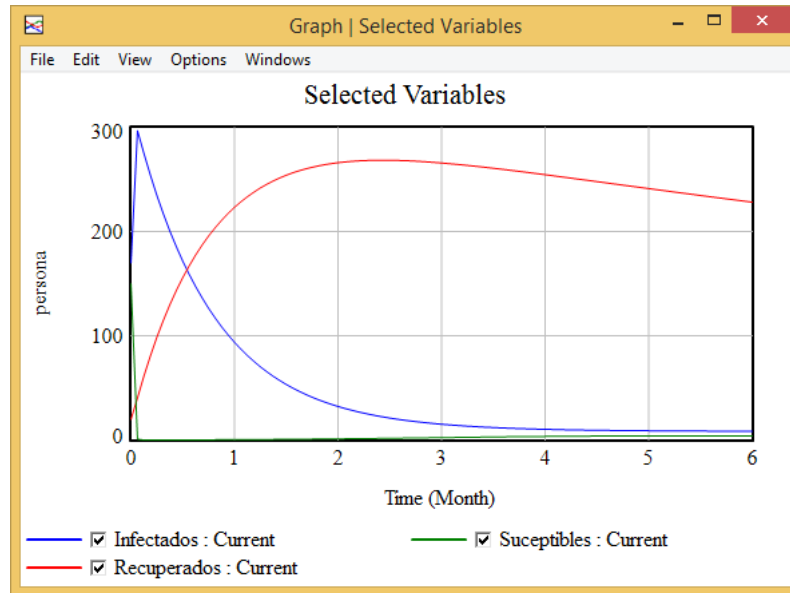


Figura 11. Gráfica de resultados de la simulación.

Al principio, los infectados aumentan a gran escala los primeros momentos del mes, pero a medida que avanza el tiempo, la población de infectados va disminuyendo hasta mantener una asíntota muy cercana a 0, gracias a la gran tasa de recuperación que presentan las personas, por lo que así la cantidad de recuperados va en aumento, aunque con un leve decrecimiento a partir del mes 6, lo que indica que aunque el dengue no desaparece totalmente, ha sido mermado satisfactoriamente.

Sin embargo, no es eliminado completamente, puesto que aún existe una tasa de incidencia presente en todos, por lo que ninguno es inmune completamente, y puede volver a ser infectado. Por ello la población de infectados nunca llega a 0, y mientras existan, siempre habrá una población de susceptibles.

6.1. Otros escenarios para simular

1. ¿Qué sucede si hay un aumento de la población debido al turismo, migración venezolana o algún otro factor?
2. ¿Cómo sería el comportamiento de la enfermedad si la tasa de recuperación disminuye drásticamente debido a la mala calidad del sistema de salud?

6.2. Trabajos previos

El dengue es una de las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores más peligrosas del mundo que son fatales en muchos casos debido a un tratamiento ineficiente. Aunque las estimaciones de riesgo relativo de la transmisión del dengue están disponibles para Bandung, una de las ciudades más pobladas de Indonesia, los casos de dengue, especialmente entre los jóvenes, han aumentado rápidamente. Sin embargo, el factor de edad aún no se ha incluido en estas estimaciones. Debido a que el tratamiento y la prevención específicos dependen de la edad, este factor debe considerarse en cualquier modelo de transmisión del dengue. En este artículo, los autores clasifican los casos de dengue en Bandung en juveniles y adultos. Cada grupo se analiza mediante el modelo SIR-SI para estimar el riesgo relativo de transmisión del dengue como una enfermedad de transmisión indirecta que tiene en cuenta el factor estocástico. Este modelo también considera una correlación espacial que afecta la distribución del dengue en un área específica para un grupo de edad en particular. Los resultados del análisis muestran que algunas áreas en Bandung tienen un riesgo de dengue medio a muy alto, especialmente para el grupo juvenil. Se espera que el Departamento de Salud de Bandung centre los programas de prevención de transmisión del dengue con mayor intensidad en este grupo. En futuras investigaciones, si los datos necesarios están disponibles, este modelo se puede aplicar a otras ciudades de Indonesia. [8]

Río de Janeiro en Brasil fue sede de los Juegos Olímpicos de verano en 2016. Se esperaba que asistiera a los juegos unos 400,000 turistas extranjeros no inmunes. Como Brasil es el país con el mayor número de casos de dengue en todo el mundo, se justifica la preocupación por el riesgo de dengue para los viajeros.

Se propone un modelo matemático (SIR-NSLI) para calcular el riesgo de desarrollar dengue para los turistas extranjeros que asisten a los Juegos Olímpicos de Río de Janeiro en 2016. Un sistema de ecuaciones diferenciales modela la propagación del dengue entre la población residente y se utiliza una aproximación estocástica para evaluar el riesgo para los turistas. Las series históricas de dengue reportadas en Río de Janeiro para los años 2000-2015 se utilizan para determinar la fuerza de infección dependiente del tiempo, que luego se utiliza para estimar los riesgos potenciales para una gran cohorte turística. El peor brote de dengue ocurrió en 2012 y este y otros años en la historia del dengue en Río se utilizan para discutir los riesgos potenciales para los turistas entre los visitantes de los Juegos Olímpicos de Río.

El riesgo individual de ser infectado por el dengue depende en gran medida de la relación asintomática / sintomática considerada, pero independientemente de esto, el peor mes de agosto en el período estudiado en términos de transmisión del dengue, ocurrió en 2007.

Si el dengue hubiera regresado en 2016 con el patrón observado en el peor mes de agosto de la historia (2007), el número esperado de casos de dengue sintomáticos y asintomáticos entre los turistas sería de 23 y 206 casos, respectivamente. El peor de los casos tendría una incidencia de 5,75 (sintomática) y 51,5 (asintomática) por cada 100.000 individuos. [9]

Uno de los factores congénitos que afectan la transmisión de la enfermedad del dengue es el tipo de sangre. Este estudio apunta principalmente a considerar el tipo de sangre O en humanos y usa una formulación de sistema de ecuaciones diferenciales para analizar el sistema dinámico por medio de un modelo SIIR-SI. El número de reproducción básico se determina como el umbral para el modelo de transmisión de la enfermedad del dengue. Este modelo se ha aplicado a los datos de casos de dengue de datos semanales que ocurrieron en Bandung en el año 2013. Cuando está respaldado por datos reales que proporcionan los parámetros y valores para las variables, este modelo puede implementarse y utilizarse para describir la dinámica sistema de transmisión de la enfermedad del dengue con respecto al tipo de sangre O en humanos. Se puede concluir que el tipo de sangre O es un factor importante a considerar al formular estrategias para la prevención y el tratamiento. Este estudio proporciona una mejora significativa en el conocimiento de la dinámica de transmisión del dengue y debería ser beneficioso para ayudar a controlar la transmisión de la enfermedad del dengue. [10]

7. Documentar y Presentar los Resultados de la Simulación

Escenario 2: Aumento de la población de susceptibles por llegada de turistas o migración. Variables:

- Tasa de nacimiento = 0.6
- Tasa de mortalidad per cápita = 0.1
- Tasa de incidencia = 0.02705
- Tasa de contagio = 0.33
- Tasa de recuperación = 0.7

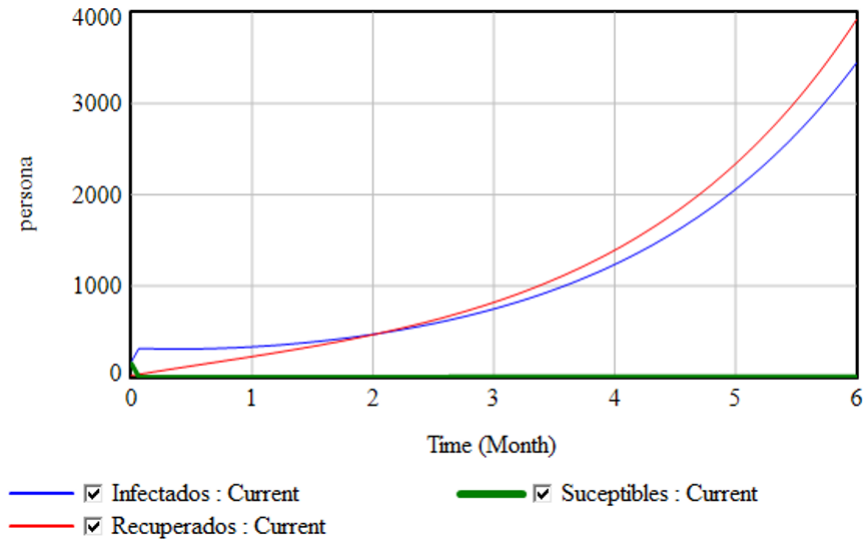


Figura 12. Gráfica de resultados del escenario 2.

El aumento de la población se representa por el aumento de la tasa de nacimientos, que entran al sistema como parte de la población susceptibles, y debido a esto la cantidad de infectados con el tiempo llegará a crecer a un nivel exponencialmente alto, así como la cantidad de recuperados, creciendo rápido durante los 6 meses. Esto indica que la enfermedad logrará prosperar, y se presentaría un brote en la ciudad de Villavicencio.

Escenario 3: Calidad de recuperación disminuye en centros de recuperación.
Variables:

- Tasa de nacimiento = 0.02
- Tasa de mortalidad per cápita = 0.1
- Tasa de incidencia = 0.02705
- Tasa de contagio = 0.33
- Tasa de recuperación = 0.2

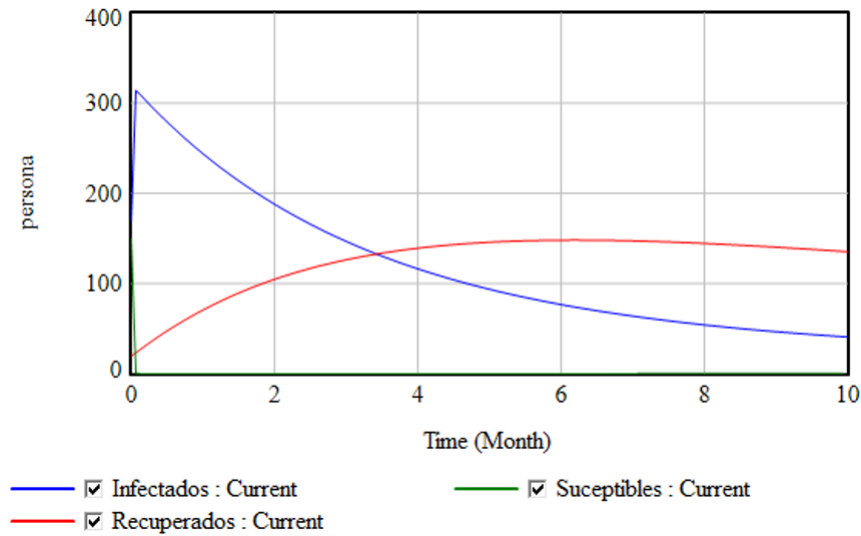


Figura 13. Gráfica de resultados del escenario 3.

La disminución en la calidad de atención de los centros de salud se representa con la disminución en la tasa de recuperación de los individuos. Debido a esto, la cantidad de las personas recuperadas es mucho menor comparado con el primer escenario de simulación, mientras que la cantidad de infectados se mantiene durante los 6 meses, por lo que la enfermedad persiste en Villavicencio, aunque su impacto ha sido mermado.

7.1. Conclusiones

- En Villavicencio hay una gran probabilidad de que se presente una epidemia del dengue durante las vacaciones, cuando vienen turistas y la población aumenta, estando expuestos a contagiarse del dengue, por ello es necesario que el gobierno municipal realice campañas de información para que las personas conozcan los riesgos de contraer dengue, y llevar a cabo medidas de salud, como jornadas de vacunación y prevención.
- Durante los meses en que se realizó la simulación, cuando prospera causa que la población infectada aumente a grandes escalas, así que es necesario habilitar centros de salud adecuado para las personas.
- El dengue tiene gran presencia en Villavicencio, indicado en las simulaciones, donde la población infectada tendía a 0, pero no llega a este valor, por lo que no puede ser completamente eliminado de la ciudad, pero si combatirlo y ayudar a curar a las personas contagiadas.
- Una solución viable para ayudar a disminuir o eliminar el brote de dengue, es disminuir la población de susceptibles mediante campañas y jornadas de

vacunación, o disminuir la población de infectados, mediante la mejora en el servicio y tratamiento de las entidades de salud de Villavicencio.

Referencias

1. Franco López, S. (2019). Evaluación de la presencia del micro-RNA 170 (miR-170) del genoma del virus dengue-2 (vDEN-2), en células de mosquito C6/36 HT infectadas.” Disponible en http://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/84283
2. Luis E. López, Aníbal Muñoz-Loaiza, Gerard Olivar-Tost y José Betancourt-Bethencourt. (2012). Modelo matemático para el control de la transmisión del Dengue.
3. Guido Camargo, Andrés Olarte, Hernando Díaz. (2012). Modelo del dengue estratificado por edad e incluyendo dos serotipos del virus para representar la dinámica en Colombia. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/9761/1/300339.2012.pdf>
4. Benjamin Ridenhour; Jessica M. Kowalik; David K. Shay. (2009). El número reproductivo básico (R_0): consideraciones para su aplicación en la salud pública. Disponible en: <https://www.scielosp.org/article/rpsp/2015.v38n2/167-176/>
5. Alcaldía de Villavicencio. (2018). “2018 Boletín epidemiológico semana 28”
6. Garayalde I. (2015). Modelos epidemiológicos basados en ecuaciones diferenciales. Disponible en: https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/TFE002211.pdf
7. “Recursos de Vensim en español”. <http://atc-innova.com/>
8. Kristiani, F., Samat, N. A., bin Ab Ghani, S. (2017). The SIR-SI model with age-structured human population for dengue disease mapping in Bandung, Indonesia. *Model Assisted Statistics and Applications*, 12(2), 151–161. doi:10.3233/mas-170391
9. Ximenes, R., Amaku, M., Lopez, L. F., Coutinho, F. A. B., Burattini, M. N., Greenhalgh, D., ... Massad, E. (2016). The risk of dengue for non-immune foreign visitors to the 2016 summer olympic games in Rio de Janeiro, Brazil. *BMC Infectious Diseases*, 16(1). doi:10.1186/s12879-016-1517-z
10. Kristiani, F., Samat, N. A. (2019). The mathematical modelling of the SIR-SI contagion model of dengue disease which considers the blood type O factor human compartment: A theoretical simulation. *Journal of Statistics and Management Systems*, 22(3), 425–446. doi:10.1080/09720510.2018.1550032