

Modelamiento computacional de la dinámica de contagio de COVID-19 mediante autómatas celulares

Luis Ocampo, *Student, UDFJC*, and Sergio Ramírez, *Student, UDFJC*,

Abstract—In this research article, a computational model is developed using cellular automaton that describes the transmission dynamics of covid-19 in a closed group of students of the faculty of engineering of the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas who attend in a face-to-face manner and are in a continuous contact environment. From the perspective of mathematical epidemiology we have the mathematical model SIR of W. O. Kermack and A. G. McKendrick, which represents the dynamics of the covid-19 disease by means of ordinary differential equations. In the present work, computational simulations will be carried out both by numerical methods and cellular automaton to analyze the evolution of the disease over time, and how the results obtained can be interpreted to generate appropriate intervention activities by the community and the university administration.

Index Terms—Epidemic, COVID, simulation, cellular automaton, artificial life.

Resumen—En el presente artículo de investigación, se desarrolla un modelo computacional mediante los autómatas celulares que describe la dinámica de transmisión del covid-19 en un grupo cerrado de estudiantes de la facultad de ingeniería de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas que asisten de manera presencial y están en un entorno de contacto continuo. Desde la perspectiva de la epidemiología matemática se tiene el modelo matemático SIR de W. O. Kermack y A. G. McKendrick que representa la dinámica de la enfermedad del covid-19 mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. En el presente trabajo se realizará las simulaciones computacionales tanto por los métodos numéricos como los autómatas celulares para analizar la evolución de la enfermedad en el tiempo, y cómo se puede interpretar los resultados obtenidos para generar adecuadas actividades de intervención por parte de la comunidad y la administración de la universidad.

I. INTRODUCTION

Durante muchas épocas han habido todo tipo de fenómenos sociales y entre ellos las pandemias han tenido un impacto significativo por tratarse de una amenaza directa a la salud pública, por esta razón, se ha intentado predecir cuáles son las posibles consecuencias de una epidemia. Estas predicciones, como en todo tipo de rubros, han evolucionado en los últimos años con base en el aumento del procesamiento computacional que consecuentemente nos permite obtener resultados más exactos y sofisticados. La sustentación de estos resultados comúnmente se sostiene en un modelo teórico matemático que representa las variables que se tienen en cuenta en una simulación computacional para representar una tendencia de cambio en una población específica.

En esta investigación, la población son los estudiantes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el cambio que se busca en la misma, es la de la propagación del COVID-19. Se busca claramente representar un modelo lo más similar posible al comportamiento real del virus dentro de un entorno social¹, por lo tanto para el mismo, se hará uso de un autómata celular para modelar el fenómeno susodicho.

II. PROBLEMÁTICA

Uno de los conflictos más comunes en los últimos años son las grandes aglomeraciones de personas por el virus del COVID-19. Obviamente, la tarea de predecir de manera exacta una pandemia es básicamente imposible y se ha de trabajar con modelos que pueden, en la medida de lo posible, realizar estimaciones medianamente precisas para poder tener unos datos estimados en torno a los cuales tomar decisiones. Actualmente en la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, específicamente en la sede de Ingeniería, contamos con un espacio físico y áreas comunes de dimensiones reducidas, por lo tanto, la sede de Ingeniería tiende a ser un espacio propenso para la rápida propagación del virus del Covid-19, por ende, hay que estudiar las formas de transmisión y que tan rápido se propaga el virus. Las rutas de transmisión de persona a persona del agente etiológico SARS-CoV-2² incluyen la transmisión directa por inhalación de microgotas y aerosoles liberadas a través de tos, estornudos, la respiración, el habla, los gritos o el canto, o por contacto de las manos con superficies contaminadas, que luego tocan las membranas mucosas orales, nasales u oculares. También se puede transmitir a través de la saliva. La gente vacunada todavía puede transmitir el COVID, aunque es más difícil. Así que los vacunados todavía deben realizar resoluciones preventivas (lavarse las manos con jabón, ponerse mascarilla, mantener la distancia social, etc.) para que la enfermedad no se propague, especialmente hacia gente vulnerable.

III. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Apoyándonos en uno de los principales conceptos de la Vida Artificial, los Automatas Celulares, vamos a implementar una simulación de la propagación del virus del Covid-19 en la sede de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, mediante un Automata con una única regla y dos

¹Se obvia que el espacio debe ser cerrado y se deben incumplir las medidas preventivas del virus

²Nombre científico del virus causante del COVID-19

valores externos que afectan la velocidad de propagación del virus, esto en un entorno de constante contacto y exposición en los espacios físicos de la sede de ingeniería, con el fin de emular propagación del virus y así proponer estrategias de prevención de contagio. Por ende, se propone un modelo dinámico ³ que permita simular el contagio de Covid-19, y compararlo con un modelo teórico, con base en las ecuaciones diferenciales del modelo epidemiológico SI para representar la evolución de la población de individuos infectados y no infectados con el virus. Con base en los resultados de los modelos se busca proponer una solución para la mitigación del virus en un espacio cerrado como lo es la sede de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y asegurar estrategias efectivas contra la epidemia.

IV. MARCO DE REFERENCIA

A. Covid-19:

La enfermedad por coronavirus de 2019, más conocida como COVID-19, es una enfermedad infecciosa causada por el SARS-CoV-2. Produce síntomas que incluyen fiebre, tos, disnea (dificultad respiratoria), mialgia (dolor muscular) y fatiga. En casos graves se caracteriza por producir neumonía, síndrome de dificultad respiratoria aguda, sepsis y choque circulatorio.

B. Epidemiología:

La epidemiología es una disciplina científica en el área de la medicina que estudia la distribución, frecuencia y factores determinantes de las enfermedades existentes en poblaciones humanas definidas. Rich la describió en 1979 como la ciencia que estudia la dinámica de salud en las poblaciones.

C. Autómatas celulares:

Un autómata celular es un modelo matemático para un sistema dinámico, compuesto por un conjunto de celdas o células que adquieren distintos estados o valores. Estos estados son alterados de un instante a otro en unidades de tiempo discreto, es decir, que se puede cuantificar con valores enteros a intervalos regulares. [11]

D. Vida artificial:

La vida artificial es un campo de estudio multidisciplinario donde el hombre trata de recrear y comprender la vida natural; así como de crear nueva vida ⁴. La aplicación de diversas técnicas y de las herramientas que ofrece la inteligencia artificial al estudio de la vida, posibilita actualmente una aproximación más adecuada a la realidad biológica y el desarrollo de modelos capaces de reproducir cualidades tanto de la vida sana como patológica con mayor perfección.

³Como modelo cambiante a lo largo del tiempo cuyos factores se especifican matemáticamente

⁴El concepto de "Vida Artificial" va de la mano de los autómatas celulares, apoyándose en este último para la gran mayoría de sus aplicaciones en el mundo de la simulación de software

V. MODELO SI

Los modelos compartimentales constituyen una técnica utilizada para simplificar la modelización matemática de las enfermedades infecciosas. La población se divide en compartimentos, asumiendo que cada individuo en un mismo compartimento tiene las mismas características. Los modelos compartimentales se pueden utilizar para predecir las características de propagación de una enfermedad, por ejemplo, la prevalencia o la duración de una epidemia.

Los orígenes de la modelación moderna de epidemias datan desde 1927, con la propuesta de Kendrick y McCormick del modelo SIR (Susceptible, Infectado y Recuperado). Éste enfoque ha impactado positivamente en el área de la organización y control de epidemias. En este trabajo se estudia el modelo SIR, así como algunas de sus modificaciones (Específicamente el modelo SI, únicamente con Susceptible e Infectado)

Según el modelo SIR, un individuo susceptible (S) en contacto con un infectado (I), tiene cierta probabilidad de adquirir la condición de infectado por medio de la transmisión del virus. Por otra parte, la capacidad de infectar susceptibles no se mantiene siempre, sino que desaparece al cabo de cierto tiempo. Ese fenómeno de recuperación puede ocurrir por diferentes mecanismos, tales como curso natural de la enfermedad con inmunidad adquirida, muerte o cuarentena. Este último NO será tenido en cuenta en el presente proyecto por efectos prácticos al momento de comparar el modelo con la simulación computacional, que no contempla la recuperación de los individuos.

Las consideraciones del modelo matemático que se desarrollará en el presente artículo, es una perturbación de los modelos que se expresan en el artículo "Modelo Matemático para la Dinámica de Transmisión del VIH/SIDA en una Población Hetero-sexual Activa" en [2] y en la tesis "Modelo Matemático de la Dinámica de Transmisión Sexual del VIH/SIDA en una Población Heterosexual Activa en el Perú" en [3], que son perturbaciones del modelo presentado por W. O. Kermack y A. G. McKendrick (1927), estos modelos permiten tener más consideraciones de la problemática de la enfermedad del VIH/SIDA, en un contexto más general donde se considera la estructuración por sexo (hombres y mujeres) de las poblaciones epidemiológicas (susceptibles e infectados)⁵ para una mejor diversificación de la evolución que puede generar la enfermedad en la sociedad. [4,5,7]. En este caso, se considerará, como se mencionó anteriormente, la enfermedad del COVID-19, donde el medio de contagio solamente sea por contacto físico entre individuos, es decir, cualquier tipo de poblaciones que tengan contacto cercano entre sí, no se considerará propagación por sexo o por otras medidas externas.

La población total se mantendrá constante durante todo el tiempo debido a que no se considerará natalidad ni mortalidad dentro del modelo. La enfermedad del Covid-19 pasa por un periodo latente antes de que los nuevos infectados puedan transmitir la enfermedad, en este modelo en particular, para efectos prácticos, este periodo latente no pasa por un tiempo de incubación sino que será instantáneo.

⁵Los modelos diferenciales se pueden aplicar para todo tipo de epidemias

Las variables (poblaciones epidemiológicas) consideradas para el modelo son las siguientes:

- S: Población de estudiantes Susceptibles en el tiempo.
- I: Población de estudiantes Infectados en el tiempo
- N: Población Total de estudiantes en la sede de Ingeniería

Los parámetros (tasas epidemiológicas) considerados son las siguientes:

- p: Tasa de contagio de un individuo susceptible por un individuo infectado.
- y: Tasa de vacunación de los individuos susceptibles (disminuye la probabilidad de contagio).

Teniendo las presentes consideraciones, el modelo matemático en E.D.O. estaría representado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\frac{dI}{dt} &= \frac{\gamma p}{N} SI \\ \frac{dS}{dt} &= -\frac{\gamma p}{N} SI\end{aligned}\quad (1)$$

donde:

$$0 < p, y < 1 \quad (2)$$

El modelo matemático expresado en (1), representa la dinámica de la transmisión del Covid-19 de acuerdo las consideraciones que se ha tenido para su formulación de acuerdo a la concepción que se tiene de la enfermedad. Por otro lado, la rigurosidad y la formalidad de la matemática exige que el sistema (1) esté bien definido para que satisfaga la Existencia y la Unicidad de las Soluciones, y además la estabilidad del modelo que se busca en todo el modelamiento matemático (local o global). Estos conceptos no se consideraran como parte del análisis del presente trabajo, pero se puede consultar en los artículos de Capasso et al [3] y Anderson [1], debido que se enfocará fundamentalmente en la parte computacional. [4,5,10].

VI. MODELO DINÁMICO

Un modelo computacional se rige bajo diferentes variables que caracterizan el sistema a estudiar. El modelo planteado para esta investigación permite simular el comportamiento de la propagación del virus COVID-19 a través de un autómata celular que se emplea en base a reglas muy simples pero efectivas en el momento de mostrarnos un comportamiento colectivo complejo como es el de un contagio masivo de un virus altamente contagioso a una distancia cercana. La simulación para contar con estos resultados se hace en el lenguaje de programación Java, que cuenta con el paradigma orientado a objetos ⁶ el cual se utiliza perfectamente en esta simulación para crear cada una de las células que van a interactuar entre sí, así como la asignación de las reglas que se van a implementar.

```
public class Student {
```

```
    private int i, j;
    private boolean isSick, isBlocked;
    private float infectionProb;
    private ArrayList<Student> neighbors;

    public Student
    (int row, int column, float p) {
        this.i = row;
        this.j = column;
        this.isSick = false;
        isBlocked = false;
        this.infectionProb = p;
        this.neighbors = new ArrayList<>(9);
    }
}
```

La clase estudiante permite establecer las características y los parámetros de cada individuo, como sus vecinos inmediatos, el estado de su salud (sano-enfermo) o su ubicación dentro de la simulación.

```
if (this.k <= 99 && student.isSick() &&
!student.getNeighbors().isEmpty()) {
    ArrayList<Student> n =
    student.getNeighbors();
    //Verificación de los vecinos
    //El vecino debe existir y
    además no estar enfermo
    for (int j = (this.k + 1);
        j < 8; j++) {
        if (n.get(j) != null &&
        !n.get(j).isSick()) {
            n.get(j).setSick(true);
            this.automaton.incSickCounter();
        }
    }
}
```

El anterior código permite establecer las normas que seguirán los autómatas celulares dentro del plano en el que se ejecutan. Primeramente se verifica que el estudiante esté enfermo y tenga vecinos, el valor de k representa la tasa de vacunación multiplicada por 100, si esta es del cien por ciento, entonces todos los estudiantes están vacunados y no hay riesgo alguno de contagio⁷, es por esta razón que se toman los casos cuando k es menor al valor 99. Después se verifican todos los vecinos del estudiante, que existan y no estén contagiados, si el estudiante está enfermo esos vecinos tienen riesgo de ser contagiados.

Las células autómatas se moverán a través del plano simulando los estudiantes, de color verde se representan los estudiantes sanos y de color rojo los estudiantes que han sido infectados.

⁶Se abstrae el significado de concepto como objeto para aplicación de análisis y diseño

⁷En la simulación se tiene que para el cien por ciento de tasa de vacunación la población es inmune al virus

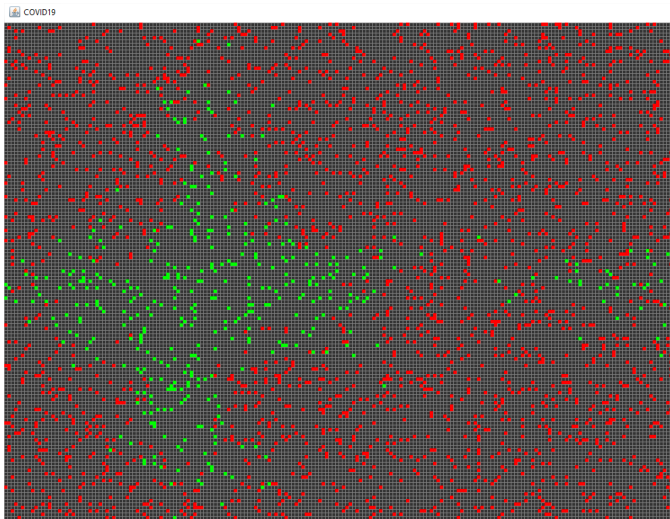


Fig. 1. Vista de la simulación de contagio en un avanzado estado

VII. INTERPRETACIÓN

La evolución de las poblaciones epidemiológicas de los estudiantes susceptibles se ve afectada por la interacción física con las poblaciones de estudiantes infectados al hacer contacto con ellos o estando cerca de su entorno. A lo largo del tiempo, la población de los infectados llega a contagiar a toda la población de susceptibles, lo que conllevaría que la población total pertenezca a la población de los infectados debido que en el modelo no se tienen en cuenta la capacidad de recuperación de los individuos una vez superan la enfermedad del Covid-19.

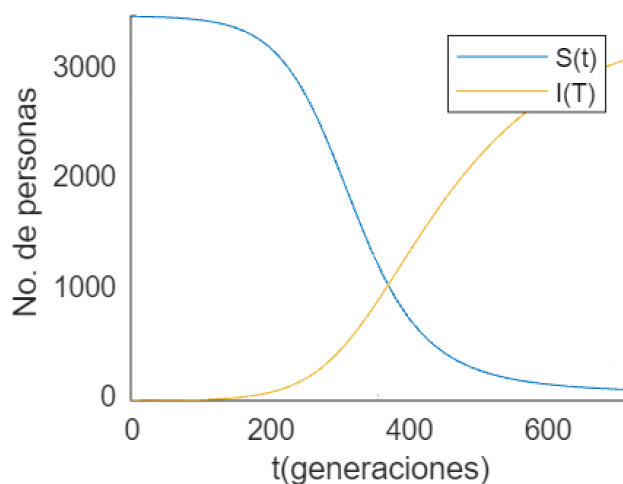


Fig. 2. Simulación de modelo SI en MatLab

En las gráficas presentadas se observa una clara tendencia muy similar de reducción de los estudiantes susceptibles y un aumento directamente proporcional de los estudiantes infectados, en el modelo teórico la curva en el cambio de la población tiene una alteración abrupta con una pendiente muy pronunciada después de un valor relativamente intermedio, en el modelo dinámico del simulador, creemos que a partir del

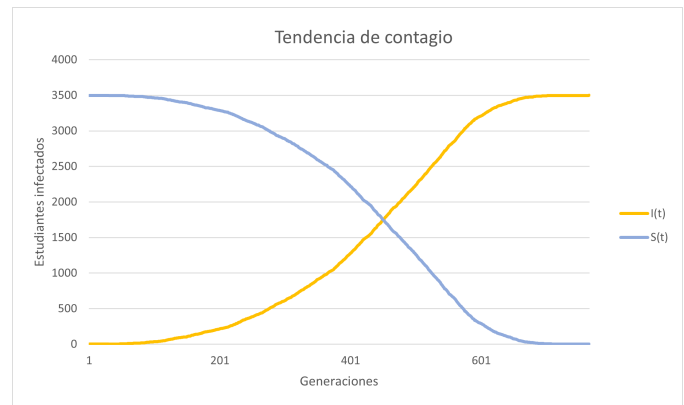


Fig. 3. Simulación de modelo dinámico en Java usando Automatas Celulares

factor de la aleatoriedad⁸ del movimiento de los individuos el resultado nos deja como consecuencia una curva con una pendiente mucho más controlada hasta un punto donde se estabiliza en donde los últimos estudiantes contraen el virus.

VIII. CONCLUSIONES

Las vacunas anti-COVID-19 son una herramienta importante para frenar la pandemia, pero no lo harán por sí solas. Las medidas sociales y de salud pública, como la vigilancia, el rastreo de contactos, el aislamiento y los comportamientos individuales de protección, que consisten en permanecer al menos a un metro de distancia de otras personas, llevar una mascarilla bien ajustada sobre la nariz y la boca, evitar los lugares y entornos mal ventilados, permanecer en casa si no se está bien, cubrirse la boca al toser y estornudar y lavarse las manos con frecuencia, siguen siendo esenciales para romper la cadena de transmisión. En esta investigación se planteó un modelo cuyos ejes centrales son la tasa de contagio y la tasa de vacunación, la primera variable no se puede modificar de ninguna forma ya que no se puede controlar, por lo menos con la tecnología actual el nivel de mortalidad de un virus y mucho menos su nivel de contagio, sin embargo, la segunda variable, sí que se puede controlar como sociedad y como decisión colectiva, por lo tanto esta variable específica dentro del modelo y dentro de la vida real debe ser determinante para la erradicación del virus.

Los beneficios de las vacunas contra la COVID-19 en la pandemia dependerá de varios factores⁹. Entre ellos, la eficacia de las vacunas, la rapidez con la que se aprueben, fabriquen y suministren, la posible aparición de otras variantes y el número de personas inmunizadas. La propuesta para la mitigación del COVID-19 está sujeta a estos factores, que influirán considerablemente en los resultados finales.

Sin duda alguna los Automatas Celulares y la Vida Artificial como conceptos y herramientas, pueden llegar a ser de gran utilidad para distintas áreas de conocimiento, por ejemplo, en

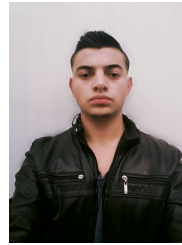
⁸Las células de la simulación del software se desplazan de manera aleatoria a cualquiera de sus 8 celdas adyacentes siempre y cuando no haya ninguna célula ocupando su nuevo destino

⁹Las vacunas reducen el riesgo de contraer COVID-19, incluido el riesgo de enfermarse gravemente y morir, en personas que están totalmente vacunadas

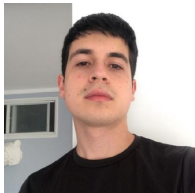
el presente proyecto, se abordaron temas como la epidemiología, la medicina y la estadística, y todas éstas, trabajando en conjunto con los Automatas celulares. Como resultado, se puede dar solución a muchos de los problemas de la actualidad, los autómatas celulares pueden ser usados para modelar desde numerosos sistemas físicos que se caractericen por tener un gran número de componentes y que interactúen localmente entre sí, hasta simular sistemas complejos adaptativos que requieran de un alto grado de precisión. Con esto, queda clara la importancia de este tipo de herramientas y la gran utilidad que pueden tener si se les da el uso adecuado.

REFERENCES

- [1] H. Kopka and P. W. Daly, *A Guide to L^AT_EX*, 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley, 1999.
- [2] Mesa Mazo M., Vergao Salazar J., Sanchez Botero C., Muñoz Loaiza A., Modelo matemático para la dinámica de transmisión del VIH/SIDA en una población sexualmente activa. Universidad de Quindío, Armenia, Colombia. Rev. Salud Pública (2010).
- [3] Brauer, F., Castillo-Chávez, C., *Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology*, (2001). NY: Springer.
- [4] Mathematical Biosciences: Capasso, V., Serio, G., A generalization of the Kermack-McKendrick deterministic epidemic model (1978).
- [5] Facultad de Ciencias Matemáticas: Pino Romero, N., Modelo matemático para la dinámica de transmisión del VIH/SIDA en una población heterosexual activa en el Perú., UNMSM (2013).
- [6] Neisser Pino Romero, Roxana López Cruz, Gabriel Wainer, Modelamiento computacional de la dinámica de transmisión sexual del VIH/SIDA mediante autómatas celulares (Cell-DEVS) (201). The Internet Journal of Infectious Diseases. Volumen 2 Number 1.
- [7] Pino Romero, N., López Cruz, R., Wainer, G., Modelamiento Computacional de la Dinámica de Transmisión de la Varicela mediante Autómatas Celulares (Cell-DEVS). Pesquimat, (2017), 20(2), 53-64.
- [8] Trottier, H., Philippe, P., Deterministic modeling of infectious diseases: theory and methods (2001). The Internet Journal of Infectious Diseases. Volumen 2 Number 1.
- [9] García, E., Life and artificial intelligence. Volume. 19, Number. 1, January 2009.
- [10] Reyes, D., Description and Applications of the Cellular Automata. Microcomputer Application Department, Autonomous University of Puebla, August 2011.
- [11] Rojas, N. Rodríguez, L., COVID-19 is in the air: why do we continue to ignore the importance of ventilation? 2021, vol. 41, n. 3 [cited 2022-08-10],



Sergio Sebastián Ramírez Estudiante dedicado y pienso que con trabajo duro se puede conseguir cualquier cosa, me apasiona programar y el desarrollo de software. En mis tiempos libres leo libros de fortalecimiento mental, así como de disciplina, creo que la constancia y la honestidad son indispensables en un equipo exitoso



Luis Alejandro Ocampo Estudiante de Noveno semestre de Ingeniería de Sistemas en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, tengo 21 años y mucha pasión por la programación, el aprendizaje continuo y mucho entusiasmo por adquirir nuevas experiencias en el desarrollo de software