



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio del Tiempo Empleado en el  
Proceso de Sanitización por COVID-  
19 de una Escuela Primaria Usando  
Simulación**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Industrial**

**P R E S E N T A**

Vianey Michelle Zavala Pérez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Ricardo Torres Mendoza



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres por creer en mí, por acompañarme en cada etapa de mi vida y por brindarme su apoyo y amor incondicional. Agradezco profundamente su guía, los sacrificios, los invaluable consejos y enseñanzas de vida que fueron los que me han hecho la persona que soy ahora.*

*A mi hermano por creer en mí, por escucharme siempre, por apoyarme de forma incondicional, por hacerme reír y por estar conmigo en las buenas y en las malas.*

*A mi compañero de vida y mi otra mitad, por enseñarme a creer en mí, por todo su cariño y apoyo incondicional que me fortalecieron como persona, y por acompañarme a través de este largo camino.*

## RESUMEN

La reciente pandemia de COVID-19 forzó a las instituciones educativas de todo el Territorio Nacional a cerrar sus puertas y suspender las clases presenciales en el mes de marzo de 2020. Meses después, la Secretaría de Educación Pública (SEP) anunció que las clases en las escuelas públicas del país se llevarían a cabo en una modalidad híbrida para el ciclo escolar 2020-2021. Es decir, las clases serían impartidas de manera remota (en línea) y de forma presencial.

Esta nueva modalidad para impartir clases representó un reto para las instituciones educativas en México, puesto que era menester que todas las escuelas y, particularmente las escuelas primarias, contaran con un protocolo de sanitización que asegurara la salud e integridad de los estudiantes al asistir a clases presenciales.

Por tal motivo, el presente proyecto se enfoca en estudio y análisis del tiempo que emplea una escuela primaria al aplicar el protocolo de sanitización cuando los estudiantes ingresan a la institución; es decir, analizar el tiempo que tardan en cada una de las estaciones de desinfección y proponer, mediante una simulación de eventos discretos, diferentes escenarios para posteriormente seleccionar la opción que emplee el menor tiempo en la aplicación del protocolo de sanitización para el total de los estudiantes inscritos en la institución y de esta forma, evitar que se afecte la jornada efectiva de estudio.

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN .....	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	7
ANTECEDENTES .....	8
<i>La educación en México</i> .....	8
<i>Los protocolos de sanitización</i> .....	8
Planteamiento del Problema.....	10
Objetivo General .....	11
<i>Objetivos específicos</i> .....	11
Capítulo 1. El sistema de educación en México.....	12
1.1 La educación básica en México .....	12
1.2 Estadísticas de la educación básica en México.....	13
1.3 Las escuelas y el COVID-19 .....	15
Capítulo 2. Estado del Arte y Marco Teórico .....	17
2.1 Estado del arte .....	17
2.2 Metodología de Simulación .....	19
2.2.1 <i>Definición de Simulación</i> .....	19
2.2.2 <i>Simulación de Eventos Discretos</i> .....	21
2.2.3 <i>Elementos de la Simulación</i> .....	22
2.2.4 <i>Etapas de la Simulación</i> .....	23
Capítulo 3. Caso de Aplicación y Modelo De Simulación .....	26
3.1 Situación actual del sistema.....	26
3.1.1 <i>Recursos</i> .....	27
3.1.2 <i>Infraestructura</i> .....	28
3.2 Metodología y Supuestos .....	29
3.3 Variables e Indicadores de Desempeño.....	30
3.4 Recolección y Análisis de datos .....	30

3.4.1 Estadística Descriptiva .....	32
3.4.2 Gráficas de Dispersión .....	33
3.4.3 Gráficas de Autocorrelación .....	35
3.4.4 Prueba de Rachas .....	37
3.4.5 Pruebas de Bondad de Ajuste.....	39
3.5 Modelo de Simulación .....	41
3.5.1 Modelo Base .....	41
3.6 Escenarios y Experimentos .....	42
3.6.1 Escenario 1.....	43
3.6.2 Escenario 2.....	44
3.6.3 Escenario 3.....	45
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	48
TRABAJO FUTURO .....	49
REFERENCIAS .....	50

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de la Educación en México.....	12
Figura 2: Diagrama del flujo del proceso de sanitización .....	26
Figura 3: Estadística descriptiva de la estación de toma de temperatura.....	32
Figura 4: Estadística descriptiva de la estación de lavado de manos .....	32
Figura 5: Estadística descriptiva de la estación de desinfección de cuerpo completo .....	33
Figura 6: Estadística descriptiva de la estación de desinfección de mochila y otros materiales.....	33
Figura 7: Gráfico de dispersión del módulo de toma de temperatura.....	34
Figura 8: Gráfico de Dispersión del módulo de lavado de manos .....	34
Figura 9: Gráfico de dispersión del módulo de desinfección de cuerpo .....	34
Figura 10: Gráfico de dispersión del módulo de desinfección de mochila.....	35
Figura 11: Gráfica de autocorrelación de toma de temperatura .....	35
Figura 12: Gráfica de autocorrelación del lavado de manos .....	36
Figura 13: Gráfica de autocorrelación de la desinfección de cuerpo .....	36
Figura 14: Gráfica de autocorrelación de la desinfección de mochila.....	36
Figura 15. Prueba de rachas de toma de temperatura .....	37
Figura 16: Prueba de rachas del lavado de manos .....	38
Figura 17: Prueba de rachas de la sanitización de cuerpo .....	38
Figura 18: Prueba de rachas de la sanitización de mochila .....	39
Figura 19: Distribución a la que se asemeja el módulo de toma de temperatura .....	39
Figura 20: Distribución a la que se asemeja el módulo de lavado de manos.....	40
Figura 21: Distribución a la que se asemeja el módulo de desinfección de cuerpo.....	40
Figura 22: Distribución a la que se asemeja el módulo de desinfección de mochila .....	40
Figura 23: Modelo base en FlexSim®.....	42
Figura 24: Escenario 1 en FlexSim® .....	43
Figura 25: Escenario 2 en FlexSim® .....	44
Figura 26: Escenario 3 en FlexSim® .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Porcentaje de estudiantes por modelo educativo de educación básica en México .....	14
Tabla 2: Porcentaje de alumnos inscritos en educación básica en el sector público y privado .....	15
Tabla 3: Resumen de áreas, recursos y tiempos de operación del sistema .....	28
Tabla 4: Tiempo en cada estación de desinfección en segundos.....	31
Tabla 5: Resumen de las distribuciones probadas y seleccionadas en la prueba de bondad de ajuste .....	41
Tabla 6: Número de estaciones de desinfección por escenario.....	42
Tabla 7: Resultados de los experimentos por cada escenario .....	46
Tabla 8: Resumen de resultados .....	47

## ANTECEDENTES

### *La educación en México*

La educación básica en México se compone de tres niveles: preescolar, primaria y secundaria (SEP). A su vez, la educación en México se divide en dos sectores dependiendo de la organización que provee la educación; el primero de ellos es el sector de la educación pública, la cual es proporcionada por el Gobierno de México, mientras que el segundo sector corresponde a la educación privada, la cual es proporcionada por instituciones educativas privadas.

De acuerdo con cifras del Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación INEE por sus siglas, en 2017 se registraron 97,553 escuelas primarias en México, de las cuales 88,526 pertenecen al sector público y 9,027 pertenecen al sector privado. En este sentido, de los 14,137,862 de estudiantes inscritos a nivel primaria, el sector público alberga a 12,824,766 de ellos; mientras que el sector privado registró 1,313,096 estudiantes matriculados a nivel primaria (INEE, 2017).

Por otra parte, el 23 de marzo de 2020, la Secretaría de Salud declaró estado de emergencia en México debido a la pandemia de SARS-COV-19 (Ebrad, 2020). En las declaraciones de la Secretaría de Salud, se decretó que la población mexicana entraría en confinamiento, deteniendo todas las actividades educacionales, laborales y todas aquellas consideradas como actividades no esenciales.

Tras estos sucesos, uno de los sectores directamente afectados por el confinamiento fue el sector educativo, puesto que el Gobierno Mexicano declaró que las clases en las escuelas públicas y privadas se llevarían a cabo de manera híbrida para el ciclo escolar 2020-2021, que comprende los periodos de agosto de 2020 a junio de 2021; esto debido a problemas económicos y sociales y en un intento de reincorporar progresivamente a los estudiantes a las actividades escolares de manera presencial (Gómez, 2021).

Esta declaración representó un reto para todas las instituciones educativas ya que las escuelas nunca habían trabajado bajo estas condiciones. Por tal motivo, fue necesario idear nuevas estrategias educativas, así como mejorar y adaptar la infraestructura de las escuelas para hacer frente a la nueva realidad emergente.

### *Los protocolos de sanitización*

Para hacer frente a la nueva realidad en la que las actividades laborales y educacionales comenzaban a reactivarse y con el fin de salvaguardar la salud e integridad de las personas, la Secretaría de Salud Federal publicó en el Diario Oficial de la Federación el “Acuerdo por el que se establece una estrategia para reanudar las actividades sociales, educativas y económicas [...]”. Aunado a esto, el Gobierno de la Ciudad de México publicó en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, el lineamiento de medidas de protección a la salud (Gobierno de la Ciudad de México, 2021).

Este lineamiento debía ser cumplidos por todos aquellos establecimientos e instituciones que reactivaran las actividades, especialmente las oficinas y los sectores que, al retorno de actividades, albergaran una considerable cantidad de individuos en sus recintos.

Entre las medidas sanitarias más importantes que establece el lineamiento antes citado se encuentran las siguientes:

- Aforo máximo del 80% de la plantilla regular
- Uso obligatorio de cubrebocas por todas las personas del lugar durante toda la jornada
- Instalación de un filtro sanitario a la entrada para toma de temperatura
- Instalación de un filtro sanitario a la entrada para aplicación de gel antibacterial con base de alcohol al 70%
- Instalación de un filtro sanitario a la entrada para desinfectar calzado
- Instalación de un filtro sanitario a la entrada para desinfectar cualquier artículo externo
- Colocar dispensadores de gel antibacterial a disposición del personal y el público
- Establecer un programa de limpieza constante en las áreas de trabajo

De esta forma, tomando en cuenta las recomendaciones del Gobierno Mexicano, las escuelas establecieron protocolos de sanitización para el regreso a clases presenciales a nivel educación básica a lo largo del territorio mexicano

Sin embargo, muchos de los protocolos adoptados resultaron ser extensivos, por lo que tomaba demasiado tiempo para los estudiantes poder completarlos adecuadamente y, derivado de esta situación, la jornada de estudio efectiva de los estudiantes comenzó a verse afectada.

## Planteamiento del Problema

El retorno a clases presenciales para la educación básica en México se convirtió en un gran reto para la educación puesto que la salud e integridad de los estudiantes debía asegurarse al establecerse protocolos que siguieran las medidas preventivas que sugirió el Gobierno Mexicano.

No obstante, la realidad es que una gran cantidad de las escuelas mexicanas carecen de la infraestructura adecuada para prevenir los contagios y, aquellas escuelas que cuentan con la infraestructura adecuada tienen sistemas de desinfección ineficientes o extensivos; de esta forma, al gastar tanto tiempo en el proceso de desinfección, la jornada escolar y de aprendizaje de los estudiantes se ve afectada (Alvarado, 2021).

En este sentido y, con el afán de realizar un estudio que pueda ayudar a eficientar el tiempo en el proceso de sanitización, se seleccionó una escuela primaria privada de modalidad escolarizada, ubicada en Toluca, Estado de México. Dicha escuela registró a 366 alumnos matriculados hasta agosto de 2021.

La escuela en la que se realizó el estudio cumple con las indicaciones y los filtros sanitarios establecidos por el Gobierno de México para el regreso a clases presenciales. Estos filtros sanitarios se componen de diferentes módulos como toma de temperatura, lavado de manos, desinfección de cuerpo completo y desinfección de mochilas.

Durante el periodo comprendido de agosto a noviembre de 2021, la institución recibió de manera presencial a la mitad de su matrícula inicial, es decir, a 180 estudiantes, los cuales eran sometidos a realizar el protocolo de sanitización a la entrada de la escuela.

La entrada a la institución se programó a las 8:00 a.m. y se destinó una hora como parte del proceso para llevar a cabo el protocolo de sanitización en cada uno de los estudiantes. Dado que la escuela sólo albergaba a la mitad del total de sus alumnos, una hora era suficiente para que cada uno de los 180 estudiantes asistentes realizara el proceso de desinfección sin afectar su jornada escolar.

Ahora bien, con el regreso a clases presenciales, las autoridades de la escuela deseaban saber si la infraestructura con la que contaban actualmente sería suficiente para recibir a los 366 estudiantes inicialmente inscritos y llevar a cabo el proceso de desinfección a cada uno de ellos sin afectar sus actividades escolares.

Por esta razón, se realizó una simulación de eventos discretos para estudiar el tiempo promedio que tardaban todos los estudiantes en completar el protocolo de sanitización desde su llegada a la escuela; así como para averiguar cuánto tiempo es empleado de su jornada de estudio a causa del proceso de desinfección.

## Objetivo General

Realizar una simulación que permita identificar en qué grado afecta el tiempo empleado para desinfección de estudiantes al tiempo efectivo de estudio en las escuelas, considerando el escenario actual y un escenario futuro con un retorno a clases completamente presencial.

### *Objetivos específicos*

- Establecer la relación entre el tiempo que toma realizar la desinfección del alumnado con la jornada efectiva de estudio.
- Realizar un comparativo sobre la capacidad actual para aforar alumnos contra un retorno completamente presencial siguiendo las medidas de sanitarias.
- Concluir sobre las actividades y/o acciones correctivas que deban llevarse a cabo para realizar la correcta desinfección sin afectar el tiempo de estudio.

# Capítulo 1. El sistema de educación en México

## 1.1 La educación básica en México

De acuerdo con la Secretaría de Educación Pública y conforme lo establecido en el Sistema Educativo Nacional, la educación en México se divide en educación Básica, educación Media Superior y educación superior; en las modalidades escolarizada y mixta (SEP).

De esta forma, el nivel básico de la educación abarca los grados de preescolar, primaria y secundaria, mientras que la educación media superior se refiere al bachillerato de tipo tecnológico, general y técnico. La educación superior comprende los grados de Licenciatura, Especialidad, Maestría y Doctorado.

Estos niveles pueden ser cursados de tal forma que los individuos asistan de manera regular y presencial a las escuelas, en donde se asignan aulas y horarios, y en los que existe un Profesor que imparta los temas a estudiar, es decir, en modalidad escolarizada.

O bien, en modalidad mixta en la que parte de la enseñanza se realiza de manera síncrona en el aula escolar y otra parte se compone de enseñanza asíncrona donde se requiere del uso de tecnologías para el estudio, autoaprendizaje por parte del estudiante y/o clases virtuales en un entorno diferente al aula escolar.

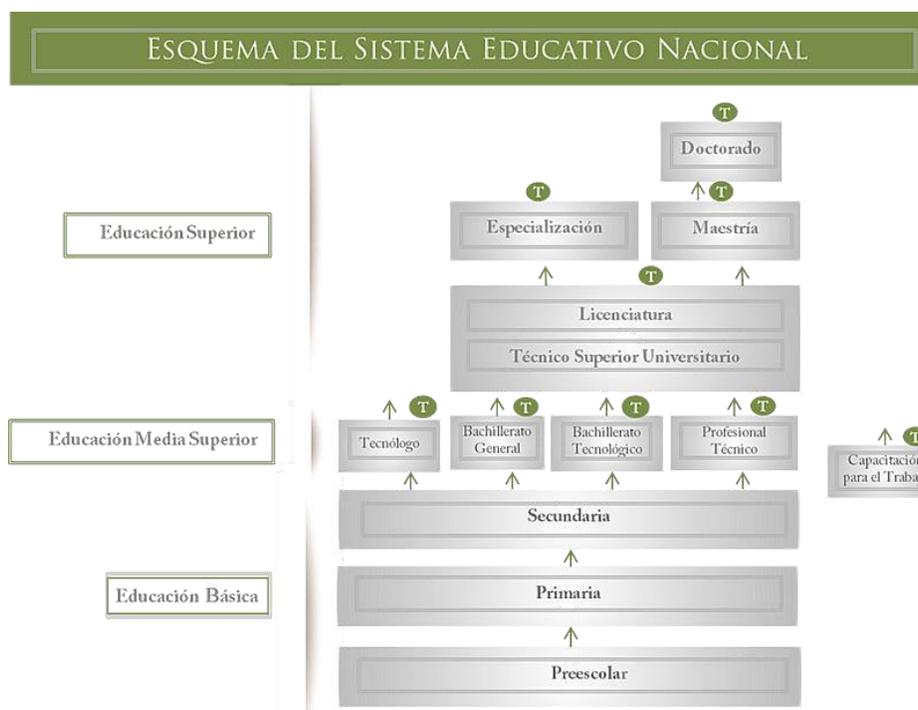


Figura 1: Estructura de la Educación en México  
FUENTE: Secretaría de Educación Pública

De manera particular, la educación básica obligatoria en México (Ver Figura 1) se cursa en doce grados distribuidos en tres niveles educativos y comprende la formación escolar desde los tres hasta los quince años. Estos niveles educativos corresponden a tres grados de educación preescolar, seis grados de educación primaria y 3 grados de educación secundaria. La educación preescolar alberga a niños desde los 3 hasta los 5 años; esta se ofrece en modalidad general, indígena y mediante cursos comunitarios y se ofrece a los infantes el desarrollo de las habilidades creativas, de lenguaje oral, de comunicación y de convivencia.

Por otra parte, la educación primaria se integra por niños de 6 a 12 años. Este sector educacional es el más grande del país, pues de acuerdo con la SEP, a él asisten más de 14 millones de niños, divididos entre sus seis grados. La educación primaria es obligatoria y al igual que el preescolar, se ofrece de forma general, indígena y como cursos comunitarios y es indispensable cursarla ya que es requisito previo para acceder a la educación secundaria (SITEAL, 2018).

El objetivo de la educación primaria es proporcionar los conocimientos y estructuras básicas de aprendizaje de los niños en materia de habilidades intelectuales, conocimientos de ciencias sociales, naturales y ciencias puras, formación ética, física y artística. Además, la Secretaría de Educación Pública ofrece libros de texto gratuitos para apoyar la enseñanza de los estudiantes.

Por último, en lo que respecta a la educación básica en México se encuentra la educación secundaria, la cual está dirigida a personas que hayan concluido satisfactoriamente la educación primaria y a adolescentes desde los 12 hasta los 15 años. La educación secundaria se ofrece en modalidad general, para adultos, para trabajadores, telesecundaria y secundaria técnica. Además, el nivel secundario es indispensable y funge como propedéutico para poder ingresar a la educación media superior o media profesional.

Asimismo, la educación en México se divide también en pública y privada. Como se mencionó anteriormente, la educación pública es aquella que proporciona el gobierno y la educación privada es aquella que proporcionan instituciones de carácter privado.

En este sentido, existe a lo largo del Territorio Mexicano, escuelas públicas y privadas que ofrecen tanto educación básica como educación media superior y superior; las cuales siguen son reguladas y siguen los planes de estudio diseñados por la Secretaría de Educación Pública.

## 1.2 Estadísticas de la educación básica en México

De acuerdo con el Instituto Nacional Para la Evaluación de la Educación en México (INEE), en su estudio sobre la educación básica y media superior realizado en 2017, de los 25 millones 780 mil 693 alumnos inscritos a nivel educación básica, se registraron 4 millones 931 mil 986 niños inscritos a nivel preescolar; 14 millones 137 mil 862 alumnos inscritos en educación primaria y 6 millones 710 mil 845 estudiantes inscritos a nivel secundaria (INEE, 2017).

También se contabilizó un total de 1 millón 217 mil 191 docentes repartidos entre los tres niveles básicos y un total de 225 mil 757 escuelas de las cuales 88 mil 939 son escuelas de preescolar, 97 mil 553 son planteles para la educación primaria y 39 mil 265 son escuelas en donde se imparte la educación secundaria (INEE, 2017).

Como se puede observar, estas cifras indican que aún en 2017, la educación primaria albergaba a la mayoría de los alumnos que cursaban la educación básica, lo cual es bastante lógico considerando que esta se compone de 6 grados, siendo el nivel en el que más tiempo tardan en cursar los alumnos.

Así pues, como se muestra en la Tabla 1, se presentaron en el estudio, las cifras por modelo educativo (general, indígena, comunitario, secundaria técnica, telesecundaria, secundaria para trabajadores) de cada nivel de educación básica. De estos datos, podemos resaltar a la educación primaria, ya que, por ser el sector más grande, se registraron un total de 13 millones 220 mil 695 estudiantes en modelo general, 808 mil 046 en modalidad indígena y 109 mil 121 en modalidad comunitaria (INEE, 2017).

Es decir, de los 14 millones 137 mil 862 alumnos inscritos a nivel primaria, 93% lo hacen en primaria general, 5.7% reciben educación primaria indígena y 0.8% lo hacen de forma comunitaria. La siguiente tabla resume el porcentaje de alumnos en cada modelo educativo para cada nivel de educación básica.

<b>Modelo educativo</b>	<b>Preescolar</b>	<b>Primaria</b>	<b>Secundaria</b>
General	88.1%	93.5%	50.6%
Indígena	8.6%	5.7%	---
Comunitario	3.3%	0.8%	0.6%
Técnica	---	---	27.1%
Telesecundaria	---	---	21.4%
Trabajadores	---	---	0.3%

*Tabla 1: Porcentaje de estudiantes por modelo educativo de educación básica en México*  
*FUENTE: Elaboración propia con datos del INEE*

Respecto a la educación pública y privada, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) comunicó que el 62% del total de las personas de entre 3 y 29 años estuvieron inscritas en el ciclo escolar 2019-2020, de las cuales 89% declararon estar inscritas en instituciones públicas y sólo 11% en instituciones privadas.

De esta forma, a nivel primaria se registraron 12 millones 824 mil 766 alumnos inscritos en planteles públicos con un total de 88 mil 526 escuelas, mientras que el sector privado registró 1 millón 313 mil 096 estudiantes en 9 mil 027 planteles educativos (INEE, 2017).

La Tabla 2 muestra el porcentaje de alumnos de educación básica en el sector público y privado en México.

<b>Sector</b>	<b>Preescolar</b>	<b>Primaria</b>	<b>Secundaria</b>
Público	89.2%	92.7%	91.4%
Privado	10.8%	7.3%	8.6%

*Tabla 2: Porcentaje de alumnos inscritos en educación básica en el sector público y privado*

*FUENTE: Elaboración propia con datos del INEGI*

En este entendimiento, el 89.2% de las escuelas preescolares corresponden al sector público y 10.8% al sector privado. El 92.7% de las escuelas primarias son públicas y el 7.3% son privadas, mientras que el 91.4% del total de escuelas secundarias son públicas y sólo el 8.6% de ellas son privadas.

Por otra parte, hasta 2017 se registró una tasa de crecimiento de 3.6% de alumnos inscritos en preescolares, un decrecimiento del -4.4% de estudiantes a nivel primaria y una tasa de crecimiento del 5.8% en lo que respecta a los alumnos inscritos a nivel secundaria (INEE, 2017).

Además, el INEE cuantificó la cantidad de alumnos por entidad federativa. De entre los resultados cabe destacar el Estado de México puesto que es la entidad con mayor número de alumnos con 591 mil 497 a nivel preescolar; la primera entidad con 1 millón 917 mil 237 de alumnos a nivel primaria y la segunda entidad con mayor número de alumnos sólo por debajo de Yucatán, con 903 mil 389 a nivel secundaria.

Respecto a la cantidad de escuelas de educación básica, el Estado de México es la entidad que cuenta con mayor número de escuelas preescolares; la tercera entidad con mayor número de escuelas primarias con 7 mil 831 y es el estado con mayor número de escuelas secundarias sumando un total de 3 mil 823.

### 1.3 Las escuelas y el COVID-19

Ante la pandemia por COVID-19, las instituciones educativas tanto públicas como privadas cerraron sus puertas a las clases presenciales y, de acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE por sus siglas, México fue el país que suspendió las clases por más días (Torres, 2021).

La suspensión de clases presenciales debido al confinamiento por la pandemia tuvo como objetivo frenar la tasa de contagios en las escuelas del país puesto que estos lugares suelen ser un foco de contagios debido a la interacción que tienen los estudiantes con sus compañeros y maestros.

Sin embargo, al cerrar las escuelas por un periodo prolongado, nuevos retos surgieron en cuanto a la calidad y la forma de la enseñanza. Para hacer frente a este problema y con el afán de evitar un rezago en la educación, las escuelas públicas y privadas desarrollaron programas para llevar a cabo la enseñanza a distancia mediante el uso de Tecnologías de la Información y Comunicación (INEGI, 2021).

Para medir el impacto de la pandemia, el INEGI desarrolló un estudio cuyo objetivo fue conocer la situación educativa de la población de entre 3 y 29 años, así como el impacto de la nueva modalidad de enseñanza híbrida y a distancia.

El estudio se realizó para la población inscrita en el ciclo escolar 2019-2020 y se estima que de los 33.6 millones de personas inscritas, el 2.2% no concluyeron sus estudios para tal periodo y el 58.9% no concluyeron por motivos directamente relacionados con el COVID. Además, para el ciclo escolar 2020-2021 5.2 millones de personas no se inscribieron a la escuela debido a problemas por COVID o por falta de dinero o recursos (INEGI, 2021).

Uno de los principales problemas de la educación básica impartida en tiempo de COVID y confinamiento fue que la mayoría de los alumnos no recibían clases ni siquiera en línea, dado que, tras dictar el confinamiento, el Gobierno de México señaló que las clases para el nivel básico y particularmente para primarias y secundarias públicas, se llevarían a cabo mediante una transmisión en televisión nacional con horarios y canales establecidos para cada nivel y grado.

Así, los estudiantes debían tomar clases desde su casa sin ningún maestro que atendiera de forma directa sus dudas o cuestiones de aprendizaje que pudieran quedar rezagadas. Es por esta razón que el 58.3% de los estudiantes opinaron que aprendían menos que con clases presenciales y el 21.7% dijo que esta modalidad carecía de un seguimiento al aprendizaje (INEGI, 2021).

Por otra parte, en lo que respecta a la educación básica privada a distancia, esta se impartió en su mayoría a través de clases en línea, en las que los estudiantes debían conectarse mediante un dispositivo móvil a una reunión en la que su profesor impartía las clases. No obstante, esta modalidad en línea también resultó complicada para muchos sectores de la educación básica, especialmente el sector primario, pues muchos estudiantes eran pequeños y, o no contaban con un dispositivo móvil particular para conectarse a sus clases, o no sabían con utilizarlos para tomar clases, enviar tareas, etc.

Por este y otros motivos económicos y sociales, el Gobierno de México anunció el regreso a clases primero en una modalidad híbrida: en la que parte de la matrícula de la escuela seguiría teniendo clases a distancia y otra parte de forma presencial; dejando la selección de la modalidad en línea o presencial a consideración de las autoridades de la escuela; y posteriormente de manera completamente presencial pero implementando siempre protocolos sanitarios que evitaran los contagios en las escuelas.

# Capítulo 2. Estado del Arte y Marco Teórico

## 2.1 Estado del arte

Existen diversos artículos relacionados con la pandemia de COVID-19 y los protocolos de sanitización, sin embargo, la mayoría de ellos se enfocan en aplicaciones al sector salud con aplicaciones directas a hospitales y casi ninguno de ellos está directamente relacionado con el sector educacional.

Tal es el caso del estudio realizado por Andrew Hummel, Awatef Ergai, et. al (2022), en el cual realizaron el diseño de una habitación de desinfección que emplea luz UV para eliminar el virus del COVID-19 en los hospitales. Los autores realizaron la evaluación del espectro UVC, así como una simulación de la exposición de fotones y la longitud de onda para diseñar una bombilla fluorescente capaz de producir luz UVC.

En este sentido, los autores Kierat, Weronika, et al; realizaron un estudio similar en el cual usaron radiación del espectro UVC para esterilizar mascarillas con el fin de poder reutilizarlas y disminuir la cantidad de residuos que estos generan (Kierat, et al; 2020). De igual forma, en un estudio realizado por Matteo Lombini, et al, los autores diseñaron una cavidad óptica con el objetivo de esterilizar el aire mediante radiación ultravioleta (Lombini, et al; 2021).

Dado que la pandemia y el confinamiento es un tema relativamente actual, no existe mucha literatura o estudios centrados en la aplicación de la simulación para garantizar el regreso a clases presenciales de forma segura en las instituciones educativas.

Así pues, existen algunos artículos que describen algunos de los efectos del aprendizaje a distancia, así como también hay algunos estudios que hablan sobre cómo es que esta modalidad a distancia ha afectado a los estudiantes, los efectos de las clases presenciales y algunas sugerencias sobre algunas medidas necesarias para el regreso a clases presenciales.

Tal es el caso de un estudio comparativo entre varias regiones de Sicilia, el cual reveló que las escuelas son una fuente de propagación de virus, entre los que se encuentra el COVID-19; pues se reportó que los contagios aumentaron en un 2.6% en las siguientes dos semanas tras la reapertura de las escuelas (Amodio, et al; 2022).

Asimismo, los autores Chang, Chien y Malagon-Palacios (2022), realizaron el modelado de una serie de tiempo sobre la reapertura de las escuelas considerando dos escenarios: uno en el que se sigue el protocolo de sanitización y otro en el que no se lleva a cabo ningún filtro sanitario a la entrada de la institución. El objetivo de esta investigación fue identificar el incremento de contagios por COVID-19 entre la comunidad de estudiantes durante los primeros 21 días tras el regreso a clases presenciales.

Estos autores realizaron un estudio retrospectivo y observacional en el cual usaron Series de Tiempo Bayesianas Estructurales (BSTS por sus siglas en inglés), las cuales son un modelo estadístico empleado para realizar pronósticos de series de tiempo, inferir el impacto causal y la selección de características (Chang, et al; 2022).

Los modelos fueron diseñados para investigar el nivel de COVID-19 en su país a través de la comparación de los casos diarios de contagios de COVID-19 tras la reapertura de las escuelas con las predicciones de los casos diarios de contagios que arrojaron las series de tiempo considerando un escenario en el que no se reanudaron las clases presenciales (Chang, et al; 2022).

Los resultados de esta investigación arrojaron un incremento significativo en el número de contagios en escuelas con alta matrícula de alumnos y en aquellas escuelas en las que no se tenía establecido un protocolo de sanitización adecuado.

En el mismo sentido, los autores Vijetha Koppa y Jeremy West (2022), mencionan en su investigación que, por cada millón de habitantes en los Estados Unidos de América, las clases presenciales generan 54 casos nuevos de contagios y 1.7 muertes más al día; contrario con las clases en modalidad a distancia, las cuales generaban 22 casos nuevos de contagios y 0.5 muertes al día.

Por otro lado, existe un artículo en el que, mediante un modelo de serie de tiempo estocástico, se estimó la duración requerida del confinamiento en Kuwait. De esta forma, los autores Zoughool, et al (2022), emplearon Cadenas de Markov en un modelo de ocho estados que representa la transmisión de COVID-19 en diferentes lugares.

Su estudio encontró que a pesar de que un confinamiento de 10 días antes del pico de la pandemia con una duración posterior de 90 días sería óptimo, la duración realista del confinamiento sería de 45 días para lograr la reducción en un 45% de contagios y hospitalizaciones en Kuwait.

De igual forma, la simulación ha sido empleada como un medio para evaluar el impacto del COVID-19 sobre las medidas preventivas en escuelas austriacas mediante el uso de simulaciones basadas en agentes y datos de rastreo conglomerados (Lasser, et al; 2022).

También, la simulación se ha usado para modelar algunos protocolos de seguridad y sanitización para el retorno seguro a las aulas en Francia. Para este estudio, los autores Di Domenico, et al (2021), emplearon un modelo epidemiológico estocástico discreto estructurado por edad basado en el perfil demográfico y en la edad de los estudiantes franceses.

En este estudio se establecieron 4 clases de edad y se emplearon matrices de contacto que habían sido medidas en Francia en 2012 para cuantificar la mezcla en cada grupo de edad dependiendo del tipo de actividad y lugar donde ocurren los contagios. Con esta premisa, se implementó una simulación de eventos discretos basada en varios factores específicos de la región de estudio, así como en las medidas de seguridad establecidas por los respectivos gobiernos.

## 2.2 Metodología de Simulación

### 2.2.1 Definición de Simulación

De acuerdo con el Diccionario Americano de Oxford (1980), la simulación es la reproducción de las condiciones de un sistema por medio de la formulación de un modelo para su estudio, es decir, la imitación de un sistema dinámico usando un modelo generado por computadora que permita evaluar y mejorar el rendimiento del sistema.

Por otra parte, Jerry Banks (1999) menciona que la simulación es la actividad de imitar un proceso o sistema del mundo real en el tiempo. Para tal efecto, es necesario generar y observar un sistema artificial basado en los componentes reales para posteriormente realizar observaciones y poder concluir acerca del sistema verdadero.

Hacer uso de la simulación, en cualquier ámbito o aplicación, provee a las partes interesadas del estudio o proyecto de un ecosistema virtual que los ayuda a prepararse para situaciones que pudiesen ocurrir en la vida real, pero con la ventaja de ahorrar tiempo, dinero, recursos (Harrell, et al.; 2004).

De esta forma, la simulación es empleada principalmente para describir y analizar el comportamiento de un sistema y puede realizarse de forma manual o con ayuda de software especializado tomando siempre en cuenta el sistema real, el modelo de simulación y los eventos del sistema (Banks, 1999).

Entonces, tenemos que la simulación es una herramienta de solución de problemas que puede ser aplicada en diversos ámbitos y giros empresariales. Considerando la modernidad y el avance tecnológico del mundo en el que vivimos actualmente, la simulación tiene un papel importante en el desarrollo y competitividad de las organizaciones.

Dentro de sus principales ventajas se encuentra la toma de decisiones adecuada, el entendimiento del porqué de las cosas que ocurren dentro del sistema, la exploración de nuevas posibilidades de procesos, el diagnóstico oportuno de problemas y entender las limitaciones del sistema. Asimismo, permite a la organización prepararse para el cambio, capacitar al equipo de trabajo, realizar inversiones sabias, entre otras (Banks, 1999).

Empero, la simulación no debe ser tomada a la ligera ya que, si bien es una poderosa herramienta de solución de problemas, también resulta ser una herramienta con aplicaciones costosas que puede generar más pérdidas que ganancias si se aplica de forma incorrecta o en situaciones que no la requieren realmente, pues para llevar a cabo una simulación, se requiere de capacitación y software especial, tiempo y dinero.

En este sentido, los autores Jerry Banks y Randall Gibson (1997) mencionan que el auge tecnológico suele confundir a las organizaciones y las hace creer que todo tipo de problema puede

ser resuelto con el uso de simulación. Por tal motivo, sugieren 10 reglas para identificar cuándo no es estrictamente necesario realizar una simulación. Estas reglas se enlistan a continuación.

1. Cuando el problema pueda ser resuelto fácilmente con un análisis de sentido común que tome menos tiempo, dinero, esfuerzo y recursos que si se realizara una simulación.
2. Si el problema puede resolverse de forma analítica y/o con el uso de modelos probabilísticos, matemáticos, de inventarios o con ecuaciones.
3. Cuando sea más fácil realizar experimentos directamente sobre el sistema real sin traer consecuencias adversas cuando este sea manipulado.
4. Cuando el costo de realizar la simulación sea mayor que los costos posibles.
5. Si las ganancias potenciales son menores al costo estimado.
6. Si no existen los recursos necesarios para realizar la simulación.
7. Cuando no haya tiempo suficiente para llevar a cabo el proceso de simulación.
8. Si no existe información suficiente o si recabar información resulta ser costoso.
9. Si el modelo no es verificable o no puede ser validado.
10. Si el comportamiento del sistema resulta ser muy complejo para ser definido.

Adicionalmente, es importante mencionar que no cualquier persona puede llevar a cabo un proyecto de simulación, ya que, además de saber manejar el programa en el que se llevará a cabo la simulación, esta persona debe tener experiencia y habilidad en temas como (Harrel, et al; 2004):

- Dirección de proyectos
- Comunicación
- Ingeniería de sistemas
- Análisis estadístico y diseño de experimentos
- Principios y conceptos de modelado
- Conocimientos de programación básica y habilidades computacionales
- Entrenamiento o capacitación en simulación
- Experiencia con el sistema bajo estudio

## ***2.2.2 Simulación de Eventos Discretos***

El autor Lawrence Leemis (1999), menciona que los modelos de simulación se clasifican según la cantidad de variables de interés y de acuerdo con la distribución (ya sea continua o discreta) que presentan sus datos de estudio, por la forma en la que se mide el tiempo (discreto o continuo), el espacio de estado y dependiendo de si el modelo es o no estacionario en el tiempo.

Las categorías más comunes de simulación son los modelos estocásticos o dinámicos, los determinísticos y los de eventos discretos o continuos. Los modelos de simulación dinámicos incluyen el paso del tiempo, es decir, analiza los cambios en el sistema a lo largo del tiempo (Harrell, et al; 2004).

Los modelos estocásticos son aquellos en los que existe una o más variables aleatorias y en los que las salidas serán igualmente aleatorias cada vez que el modelo se corra. Los modelos de simulación determinísticos por su parte no tienen componentes aleatorios, por lo que los estados futuros del sistema se determinan una vez que se han definido los valores de entrada y el estado inicial del sistema y siempre producirá las mismas salidas sin importar cuantas veces se corra el modelo (Harrell, et al; 2004).

De acuerdo con los autores Herrell, Ghosh y Bowden (2004), los modelos de simulación de eventos discretos representan los efectos de los eventos en el sistema conforme estos ocurren en el tiempo. Este tipo de simulación emplea métodos estadísticos (como modelos Monte Carlo) que generan un comportamiento aleatorio para sí estimar el rendimiento del sistema. En contraparte, en la simulación de eventos continuos, las variables de estado del sistema cambian con respecto al tiempo.

En este sentido, una simulación de eventos discretos es aquella en la que las variables de estado sólo cambian en puntos discretos del tiempo en el que se producen los eventos. Además, existe en ellos una cantidad limitada de recursos, por lo que las entidades deben esperar en una ‘cola’ para obtener un recurso del sistema (Banks, 1999).

Así, la simulación de eventos discretos ha sido principalmente empleada para modelar los sistemas de manufactura con el afán de mejorar el diseño y operación de las plantas productivas, aunque en la actualidad, puede ser igualmente aplicable para modelar sistemas que puedan verse como una red de colas (o filas) en las que cualquier objeto individual o entidad pasa a través de una serie de actividades en las que existe debe esperar de por medio en una cola (Brailsford, et al; 2014).

La duración de las actividades se muestra a partir de funciones de distribución de probabilidad por lo que estos modelos son de naturaleza estocástica ya que tratan con entidades y actividades diferentes y programadas en un punto del tiempo (Brailsford, et al; 2014).

### ***2.2.3 Elementos de la Simulación***

Un sistema se compone un conjunto de elementos interrelacionados entre sí que trabajan en conjunto para llevar a cabo una determinada tarea u objetivo (Harrell, et al; 2004). Teniendo esto en mente, existen varios elementos a tomar en cuenta a la hora de realizar el modelado de un sistema dado que estos definen el qué, quién, dónde y cómo se realiza el proceso.

Los principales aspectos para tomar en cuenta al realizar un proyecto de simulación son: el sistema, el modelo y los eventos. El sistema hace referencia al proceso real que se desea simular. El modelo se refiere a la representación del sistema actual y los eventos son las ocurrencias que cambian el estado del sistema (Banks, 1999).

A este respecto, en un modelo de simulación siempre se deben tener en cuenta las variables de estado del sistema, las variables de decisión y las variables de respuesta. Las variables de estado son las que, como su nombre lo indica, muestran el estado del sistema en un punto del tiempo.

Las variables de decisión (o variables independientes) son aquellas que pueden modificar el estado del sistema si es que sufren una modificación y que proporcionan información prescriptiva sobre el mismo. Por último, las variables de respuesta (o variables de salida o de rendimiento) son aquellas que miden el rendimiento del sistema en respuesta las variables de decisión (Harrell, et al; 2004).

La metodología para determinar estas variables dependerá del propósito del estudio, pero es menester que las variables se definan ya que con ellas se realizará un modelo de eventos discretos o un modelo de eventos continuos, según sea el caso.

El modelado de sistemas también considera a las entidades, que son los objetos que van siendo procesados en el sistema, los atributos del sistema considerados como valores locales; los recursos y las actividades y las demoras (Banks, 1999).

Dentro de las entidades se encuentran también los recursos humanos o animados, como los clientes, las entidades inanimadas como los documentos y las que son intangibles como las llamadas (Harrell, et al; 2004).

Asimismo, al construir un modelo de simulación, se deben considerar los controles del sistema y las actividades que requieren de recursos para realizarse, como el procesamiento de entidades, los recursos de movimiento y el mantenimiento, ajustes, reparaciones, etcétera (Harrell, et al; 2004).

### ***2.2.4 Etapas de la Simulación***

Como todo proyecto, un proyecto de simulación exitoso se lleva a cabo a través de diferentes etapas. Una vez que se ha estudiado el sistema, que se identificaron las variables, los recursos, eventos, actividades, etc. en el sistema real, se procede a realizar el modelo de simulación.

De acuerdo con los autores David T. Sturrock (2010) y Jerry Banks (1999), podemos determinar 10 etapas o pasos para realizar un modelo de simulación aplicado a un proyecto. Estas etapas se mencionan a continuación.

1. Definir los objetivos
2. Identificar y formular el problema
3. Entender el sistema
4. Crear especificaciones funcionales
5. Administrar el proyecto
6. Recolectar datos
7. Construir y verificar el modelo
8. Validar los resultados
9. Experimentar, analizar y presentar los resultados
10. Implementar el modelo

La primera etapa se refiere a definir el objetivo del proyecto de simulación, es decir, qué se pretende lograr con él, qué se espera obtener, quiénes son las partes interesadas en realizar dicho estudio, quiénes son los clientes o hacia quién va dirigido el proyecto, cuáles son las expectativas del cliente o de las personas interesadas; por poner algunos ejemplos.

Esta primera etapa es particularmente necesaria puesto que da un panorama de lo que se quiere o se busca, quién lo quiere y qué se espera lograr con ello. La etapa de definición de objetivos marca la dirección que tomará el proyecto de simulación.

En la segunda etapa se debe identificar cuál es el problema que se pretende resolver. Además, aquí es posible identificar si el problema planteado debe ser necesariamente resuelto con ayuda de la simulación o si es mejor emplear otro tipo de herramienta de solución de problemas (Banks, 1999).

La tercera etapa consiste en el entendimiento del sistema; esto es identificar los componentes y necesidades del sistema para que este pueda ser modelado posteriormente. Para entender el sistema, se debe revistar y analizar cada proceso que lo compone (Sturrock, 2010). En este punto es

necesario identificar y entender los aspectos clave que componen el proceso, no resolver el problema; para entender el sistema es necesario realizar algunas preguntas como:

- ¿Cuáles son los componentes del sistema?
- ¿Qué procesos lo conforman?
- ¿Cuáles son las entidades que emplea?
- ¿Cómo se transforman las entidades?
- ¿Cuáles son las constantes?
- ¿Qué procesos son clave para definir el sistema?

El cuarto paso consiste en definir una especificación funcional del proyecto de simulación. Esto se refiere a establecer el alcance y nivel de detalle del proyecto, así como definir los requerimientos de datos, los supuestos, los controles lógicos del sistema, el análisis de datos, los reportes a presentar, entre otros (Sturrock, 2010).

También se definen en este paso los entregables e hitos del proyecto y es recomendable realizar un prototipo para identificar si el sistema bajo estudio es más complejo de lo que se esperaba y para que el cliente o las partes interesadas confirmen si sus necesidades son satisfechas y si es eso lo que realmente esperan del sistema (Sturrock, 2010).

La quinta etapa habla de la administración del proyecto, es decir, definir y seguir los tiempos establecidos para cada etapa del proyecto. Para lograr esto, es necesario aportar sólo información necesaria y valiosa o seleccionar un subconjunto de aproximaciones lo más cercanas posibles al sistema, para completar las tareas en el tiempo establecido anteriormente en las especificaciones funcionales (Sturrock, 2010).

Una vez realizados los primeros cinco pasos, es momento de entrar más en materia del modelo de simulación, puesto que la sexta etapa consiste conocer los datos que aporta el sistema y recolectar sólo aquellos que ayuden a cumplir los objetivos establecidos en el proyecto.

De esta forma, los objetivos deben ser evaluados para determinar en qué partes se necesitan datos más precisos. Se puede emplear el modelo o se pueden realizar algunas pruebas piloto para identificar dónde se necesitan mejores datos; si tras correr las pruebas piloto los cambios en el sistema son significativos, puede ser que se necesiten mejores datos (Sturrock, 2010).

El autor Lawrence Leemis (1999) menciona que existen dos enfoques para la recolección de datos: el primero que es el enfoque clásico en el que se lleva a cabo un experimento para recopilar datos, ideal para trabajar en términos de control; y el segundo enfoque que es el exploratorio donde las preguntas se abordan por medio de datos existentes, el cual es mejor para trabajar en términos de costos.

La séptima etapa consiste en la construcción y verificación del modelo. La construcción del modelo de simulación pretende representar el sistema real con los objetivos establecidos y se realiza mediante un *software* o programa de simulación, generalmente.

La construcción del modelo se puede realizar con alguno de los dos enfoques diferentes: Enfoque de amplitud o enfoque de profundidad. En el enfoque de amplitud, se construye todo el sistema o una gran parte de él con un mínimo nivel de detalle para verificar que este funcione antes de pasar a la siguiente etapa. Por el contrario, en el enfoque de profundidad se selecciona una pequeña sección del sistema y se modela con mayor detalle para hacer la verificación del sistema más ágil (Sturrock, 2010). La verificación del modelo terminará una vez que el modelo de simulación represente adecuadamente las especificaciones requeridas.

La octava etapa de la simulación consiste en la validación de resultados, esto es, determinar si el modelo verdaderamente representa el sistema real necesario para cumplir los objetivos. Para realizar la validación, se puede emplear la iteración y comparación del modelo con el sistema real o comparar los resultados por un periodo determinado de tiempo (Sturrock, 2010).

La penúltima etapa corresponde al experimento, análisis y presentación de resultados. Los experimentos se refieren a crear los diferentes escenarios establecidos en la especificación funcional, escenarios basados en lo aprendido a lo largo del proyecto, entre otros. El análisis y presentación de resultados debe realizarse conforme a los tiempos establecidos y se deben generar reportes que contengan información concreta y precisa de acuerdo con las necesidades de las partes interesadas (Sturrock, 2010).

Finalmente, la etapa final consiste en la implementación del modelo de simulación una vez que este ha sido verificado, validado y que ha demostrado que es funcional y que cumple con las necesidades y objetivos del proyecto para trabajar con él (Banks, 1999).

# Capítulo 3. Caso de Aplicación y Modelo De Simulación

## 3.1 Situación actual del sistema

Como se mencionó en un apartado anterior, la escuela estableció el protocolo de sanitización mediante diferentes estaciones de desinfección por las que pasan los estudiantes a la llegada a la escuela. El siguiente diagrama muestra las etapas de dicho proceso.

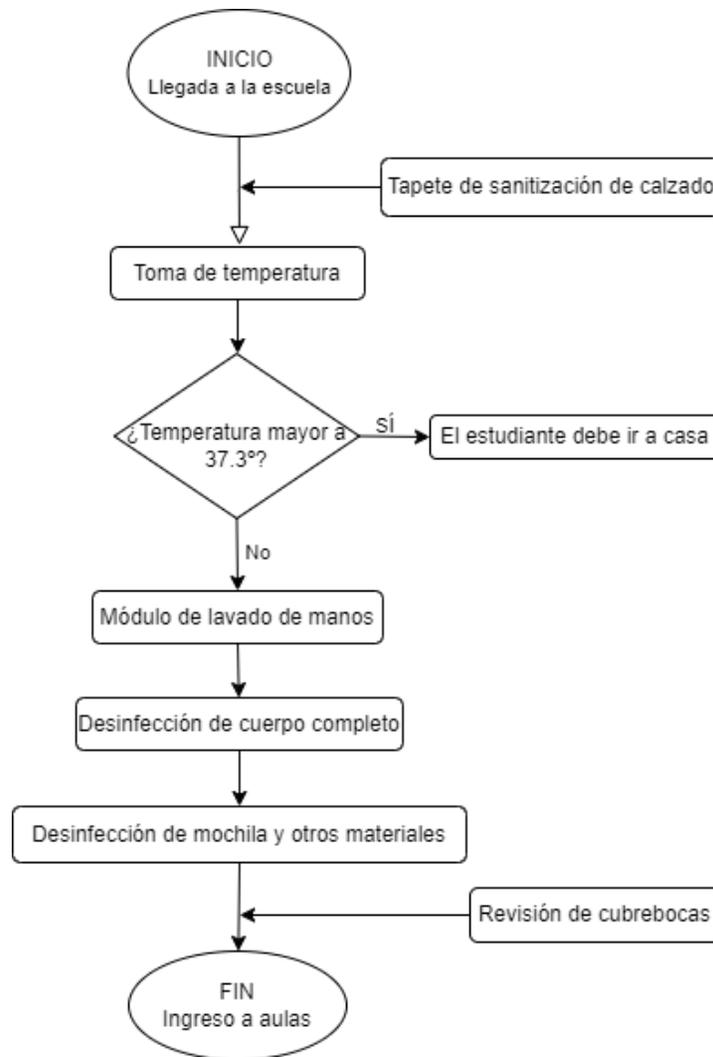


Figura 2: Diagrama del flujo del proceso de sanitización  
FUENTE: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 2, el sistema inicia cuando el estudiante llega a la escuela, aquí se realiza la sanitización del calzado con ayuda de los tapetes de desinfección; luego este pasa a la estación de toma de temperatura, en donde se evaluará si el alumno puede ingresar a la institución o si este debe regresar a casa.

Una vez que se determinó que el alumno puede ingresar, pasa la estación de lavado de manos, en donde debe aplicar la técnica de correcto lavado de manos anunciada por la Secretaría de Salud Pública.

Luego entonces, el alumno pasa a la estación de desinfección de cuerpo completo y posteriormente a la estación de desinfección de mochila y cualquier otro material que traiga consigo el estudiante. Para estas últimas dos estaciones, la escuela emplea una solución antibacterial y/o antiséptica, la cual se rocía sobre la ropa y materiales del niño para realizar la sanitización.

Una vez realizado todo el proceso de desinfección, se revisa que los alumnos tengan puesto correctamente el cubrebocas y finalmente ingresan a sus respectivas aulas.

### ***3.1.1 Recursos***

La institución cuenta con diversos recursos tanto físicos como materiales con los cuales se lleva a cabo todo el proceso. Estos recursos son los que se enlistan a continuación.

- Dos termómetros infrarrojos
- Cuatro mesas
- Doce sillas
- Dos tapetes de desinfección
- Ocho lavamanos
- Cubrebocas desechables
- Gel antibacterial con alcohol al 70%
- Desinfectante y antiséptico
- Jabón líquido para manos
- Ocho Maestras
- Una enfermera

En este sentido, 2 de las 8 maestras se encuentran en la estación de toma de temperatura, pues son ellas quienes realizan esta actividad. Además, otras 2 profesoras se encuentran en los lavamanos para cerciorarse que los alumnos laven sus manos de forma adecuada.

Dos maestras se encuentran en las estaciones de desinfección de cuerpo completo y otras 2 maestras se encuentran en las estaciones de desinfección de mochila y otros materiales. La enfermera por su parte funge como supervisora de todo el proceso ya que lo monitorea y brinda asistencia a las profesoras y alumnos en caso de ser necesario.

### 3.1.2 Infraestructura

Adicionalmente, la escuela cuenta con un almacén en el que se guardan los recursos materiales como jabón, cubrebocas, entre otros; de donde los profesores y/o autoridades educativas van tomando los materiales conforme se vayan requiriendo a lo largo del proceso.

También se puede contabilizar en la infraestructura, las áreas o módulos diseñados para realizar el proceso de desinfección. En resumen, la infraestructura con la que cuenta la escuela es la siguiente:

- Bodega de suministros (Cubrebocas, equipo de desinfección, etc.)
- Área de carrusel de llegada (A1)
- Área de toma de temperatura (A2)
- Área de lavado de manos (A3)
- Área de desinfección de cuerpo completo (A4)
- Área de desinfección de mochila y revisión de cubrebocas (A5)

La Tabla 3 muestra un resumen de las estaciones de desinfección, los tiempos de operación y los recursos establecidos por cada área de trabajo.

Área	Actividad	Tiempo de la actividad (s)			Recurso de la actividad	Siguiete área	Distancia entre áreas (m)
		Máx.	Min.	Promedio			
Temperatura (A2)	Toma de temperatura	32	2	9	2 profesores 2 termómetros	Lavado de manos	5
Lavado de manos (A3)	Lavado de manos	140	100	121	1 enfermera 2 profesores 8 lavabos	Desinfección de cuerpo completo	2
Cuerpo completo (A4)	Desinfección de cuerpo completo	23	15	19	2 profesores 2 equipos de desinfección	Desinfección mochila y revisión de cubre boca	6
Mochila (A5)	Desinfección de mochila	87	4	24	2 profesores 2 equipos de desinfección	Entrada a salón de clases	-----

Tabla 3: Resumen de áreas, recursos y tiempos de operación del sistema  
FUENTE: Elaboración propia

## 3.2 Metodología y Supuestos

La metodología seguida para este proyecto consistió en 5 pasos. Estos son:

1. Entendimiento del sistema

Esta etapa consiste en observar y comprender lo que pasa dentro del sistema para visualizar todos sus componentes.

2. Recolección y análisis de datos

A lo largo de una semana, se recolectaron los tiempos de operación del sistema y posteriormente se realizó un análisis de estos para realizar la simulación.

3. Modelo de simulación

Con el análisis de datos se realizó el modelo de simulación del sistema actual, el cual fue validado por la institución para verificar que corresponda al sistema real.

4. Escenarios y experimentos

A fin de proporcionar una solución al problema, se plantearon diferentes escenarios, los cuales fueron sometidos a experimentos para determinar la solución más adecuada al problema.

5. Resultados

Finalmente se presentaron los resultados y se realizaron algunas recomendaciones.

También, se establecieron diferentes supuestos sobre el sistema bajo estudio con el objetivo de justificar la forma en la que se desarrolló la simulación del proceso. Estos supuestos son:

- Todos los días presentan un tiempo y comportamiento similar, por lo que no es necesario analizar los datos día por día durante el periodo de observación.
- Los Profesores que se encuentran en cada una de las estaciones de desinfección no presentan fatiga ni desgaste significativo para asumir que se vuelven lentos en algún punto del proceso.
- Los Profesores situados en las diferentes estaciones de desinfección son siempre los mismos.
- El tiempo que se emplee en completar el proceso de desinfección de todos los estudiantes, será el tiempo descontado de la jornada escolar.

### 3.3 Variables e Indicadores de Desempeño

Como se mencionó en el apartado 2.2.3 Elementos de la Simulación, las variables del sistema son un elemento primordial para realizar el modelado. Teniendo esto en mente, se establecieron las variables de entrada y salida del sistema. Las variables de entrada son:

- Tiempo en cada estación de desinfección
- Tiempo de llegada de los alumnos a la escuela

De esta forma y dado que el objetivo principal es definir si el tiempo establecido por las autoridades educativas para llevar a cabo el proceso de desinfección de los estudiantes es adecuado para evitar afectar su jornada efectiva de estudio, se establecieron los indicadores de desempeño para medir el rendimiento del sistema.

Los indicadores de desempeño dependen directamente del número de estaciones de desinfección y del tiempo empleado en cada una de ellas. También, están relacionadas con el tiempo efectivo o jornada de estudio.

En este sentido, este modelo toma a los indicadores de desempeño como las variables de salida puesto que estos son los mismos puntos que deben ser medidos y monitoreados. Así, las variables de salida e indicadores de desempeño para este sistema son los siguientes:

- Tiempo total del proceso de sanitización (Del primer alumno en llegar hasta el último en salir).
- Tiempo efectivo de estudio

### 3.4 Recolección y Análisis de datos

Los datos tomados corresponden al tiempo de llegada de los estudiantes a la escuela, así como el tiempo empleado en cada estación de desinfección. La recolección de datos se realizó a lo largo de una semana mediante observación directa.

Se tomó una muestra de 425 datos por cada estación de sanitización. Estos datos se recopilaron a lo largo de una semana en la escuela bajo estudio. En este sentido, el tiempo que los estudiantes emplean en cada estación de desinfección se puede resumir en la siguiente tabla.

	<b>Toma de Temperatura</b> [seg]	<b>Lavado de manos</b> [seg]	<b>Desinfección de Cuerpo completo</b> [seg]	<b>Desinfección de mochila</b> [seg]
Tiempo máximo	17	140	23	87
Tiempo mínimo	3	100	15	4
Tiempo promedio	8.32	121	19	24
Desviación estándar	3.51	11.88	2.64	12.8924

Tabla 4: Tiempo en cada estación de desinfección en segundos  
FUENTE: Elaboración propia

La Tabla 4 muestra el promedio del tiempo empleado en cada estación de desinfección, así como la desviación estándar correspondiente a cada módulo. Estos datos son los que se usaron posteriormente en el modelo de simulación, ya que son parte de los parámetros que se programaron para cada estación en el modelo de simulación.

Ahora bien, partiendo de los datos recolectados, se realizó un análisis de interdependencia con el objetivo de conocer la distribución de probabilidad a la que se asemeja el comportamiento de los datos de cada estación de sanitización y para determinar si los datos son aleatorios.

Es importante conocer las distribuciones de probabilidad dado que estas forman la otra parte de los parámetros necesarios para realizar la simulación. Estas pruebas de interdependencia se realizaron con el *software* StatFit para cada uno de los módulos del sistema y las cuales consisten en las siguientes pruebas:

- Estadística descriptiva  
La estadística descriptiva nos muestra un resumen de los datos analizados, es decir, muestra los valores máximos, mínimos, la media, mediana, moda, desviación estándar, varianza, entre otros valores que han sido analizados del conjunto de datos ingresado al programa.
- Gráficos de dispersión y correlación  
Los gráficos de dispersión y correlación muestran de una forma gráfica, los datos como puntos en un diagrama en el que se puede identificar de una forma más sencilla si la información presenta tendencias o correlación entre los datos.
- Prueba de rachas  
La prueba de rachas ayuda a identificar si los datos son o no aleatorios, pues realiza pruebas de medianas y de punto giratorio, las cuales presentan diferentes valores como el valor P de cada prueba, determinando así si se rechaza o no la hipótesis inicial de que los datos son verdaderamente aleatorios.

- Prueba de bondad de ajuste

La prueba de bondad de ajuste somete los datos a diferentes pruebas con diferentes distribuciones de probabilidad y selecciona aquella a la que más se asemeje el comportamiento de los datos.

### 3.4.1 Estadística Descriptiva

La estadística descriptiva se generó con el programa StatFit. El principal objetivo de este estudio fue obtener valores como el tiempo máximo, mínimo, el promedio y la desviación estándar de cada estación que compone el proceso de sanitización.

Los datos que proporcionó el programa fueron de utilidad para generar la Tabla 4, la cual resume los tiempos antes mencionados. Sin embargo, para fines prácticos, a continuación, se muestra toda la información de la estadística descriptiva para cada estación de desinfección.

descriptive statistics	
data points	50
minimum	3
maximum	17
mean	8.32
median	8
mode	5
standard deviation	3.51928
variance	12.3853
coefficient of variation	42.299
skewness	0.735367
kurtosis	-0.220094

La Figura 3 muestra la estadística descriptiva correspondiente a la estación de toma de temperatura.

Como se puede observar en la imagen, esta estación tiene un tiempo mínimo de 3 segundos, un tiempo máximo 17 segundos y una media de 8.3 segundos con una desviación estándar de 3.5 segundos.

Figura 3: Estadística descriptiva de la estación de toma de temperatura

FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

descriptive statistics	
data points	50
minimum	101
maximum	140
mean	121.3
median	122
mode	101
standard deviation	12.8718
variance	165.684
coefficient of variation	10.6116
skewness	-0.045006
kurtosis	-1.4096

Por otro lado, la Figura 4 presenta los resultados de la estadística descriptiva correspondiente a la estación de lavado de manos.

Esta estación tiene un tiempo mínimo de 101 segundos, un tiempo máximo de 140 segundos y una media de 122 segundos con una desviación estándar de 12.9 segundos.

También, podemos ver que este es el módulo que más tiempo toma en el proceso de desinfección.

Figura 4: Estadística descriptiva de la estación de lavado de manos

FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

descriptive statistics	
data points	50
minimum	15
maximum	23
mean	18.7
median	19
mode	19
standard deviation	2.54149
variance	6.45918
coefficient of variation	13.5909
skewness	0.0792534
kurtosis	-1.16571

Figura 5: Estadística descriptiva de la estación de desinfección de cuerpo completo  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 5 expone los datos correspondientes a la estadística descriptiva de la estación de desinfección de cuerpo completo.

Aquí se tiene un tiempo mínimo de 15 segundos, un tiempo máximo de 23 segundos y un promedio de 18.7 segundos con una desviación de 2.5 segundos.

descriptive statistics	
data points	50
minimum	5
maximum	56
mean	22.16
median	19.5
mode	19
standard deviation	11.5305
variance	132.953
coefficient of variation	52.0331
skewness	0.842515
kurtosis	0.199324

Figura 6: Estadística descriptiva de la estación de desinfección de mochila y otros materiales  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

Finalmente, la Figura 6 muestra la estadística descriptiva correspondiente a la estación de desinfección de mochila y otros materiales.

En esta estación se tiene un tiempo mínimo de 5 segundos, un tiempo máximo de 56 segundos y un promedio de 19.5 segundos con una desviación de 11.5 segundos.

Con esta información, podemos ver que esta es la segunda estación que consume más tiempo dentro del proceso.

### 3.4.2 Gráficas de Dispersión

El segundo paso del análisis de datos fue obtener los gráficos de dispersión de cada estación. Estos gráficos sirven para verificar si existe una correlación o tendencias. Es empleado cuando se tiene un conjunto de datos extenso del que se desea conocer la relación entre las variables, puesto que, al ser un gráfico, muestra de una forma visual la distribución de los datos de tal forma que es más sencillo identificar patrones.

A continuación, se presentan los gráficos de dispersión para cada estación del proceso, en los que se muestran los tiempos en segundos. Es importante mencionar que los ejes tanto el de las abscisas (horizontal, X) como el de las ordenadas (vertical, Y), representan los límites del tiempo empleado en cada módulo.

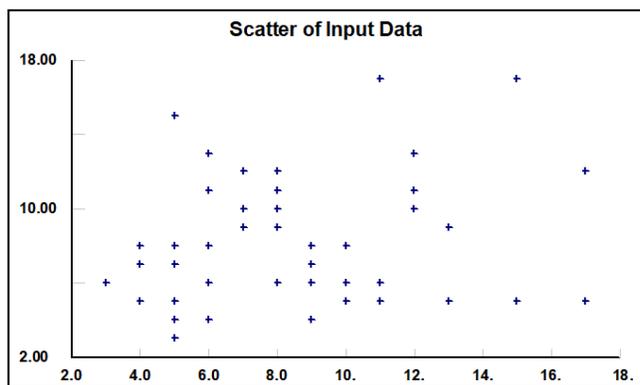


Figura 7: Gráfico de dispersión del módulo de toma de temperatura  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

En la Figura 7 se muestra el gráfico de dispersión de la estación de toma de temperatura, en donde podemos observar que los datos no presentan ninguna tendencia, así como ningún tipo de correlación, por lo que podemos asumir que no existe dependencia entre los datos de esta estación.

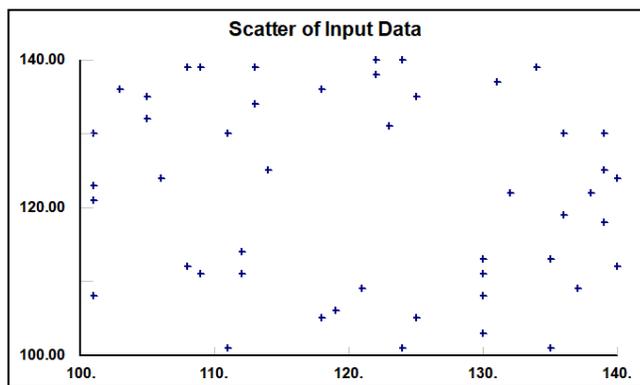


Figura 8: Gráfico de Dispersión del módulo de lavado de manos  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 8 corresponde al gráfico de dispersión de la estación de lavado de manos.

Aquí tampoco se observa ninguna tendencia, por lo que se puede asumir también que los datos no presentan dependencia.

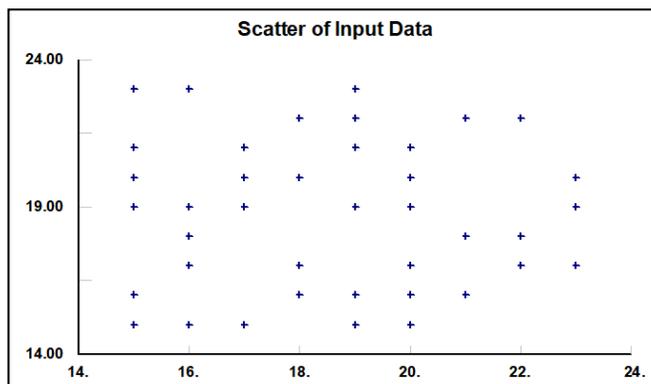


Figura 9: Gráfico de dispersión del módulo de desinfección de cuerpo  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 9 presenta el gráfico de dispersión del módulo de desinfección de cuerpo completo, en el que se observa que, al igual que en las estaciones anteriores, no existe tendencia y por tanto no hay dependencia en los datos.

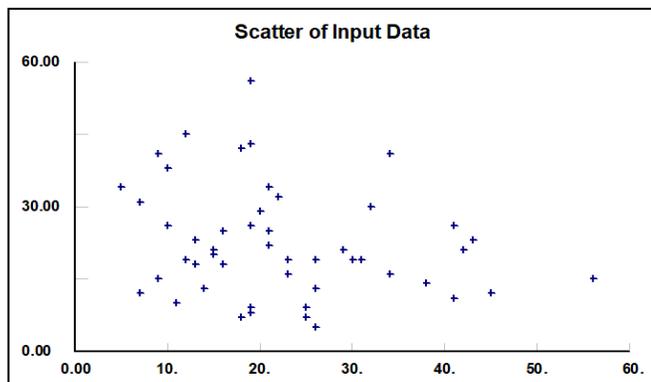


Figura 10: Gráfico de dispersión del módulo de desinfección de mochila  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

En la Figura 10 se expone el gráfico de dispersión del módulo de desinfección de mochila y otros materiales.

En esta estación tampoco se observan tendencias ni ningún tipo de correlación, por lo que podemos decir que los datos son independientes.

### 3.4.3 Gráficas de Autocorrelación

La autocorrelación es un fenómeno de los datos asociados al tiempo, la cual, dependiendo del valor de autocorrelación y la representación gráfica de los datos, se puede determinar si las observaciones recabadas son o no independientes. En este caso, como la muestra tomada está directamente relacionada con el tiempo en cada estación de desinfección, es necesario hacer un estudio de autocorrelación de los datos.

En este estudio se pueden obtener valores entre el 0 y 1, pero se busca obtener un valor de correlación cercano a cero para afirmar que los datos no presentan autocorrelación y, por tanto, que son independientes en el tiempo. A continuación, se muestran las gráficas de autocorrelación de cada estación de desinfección.

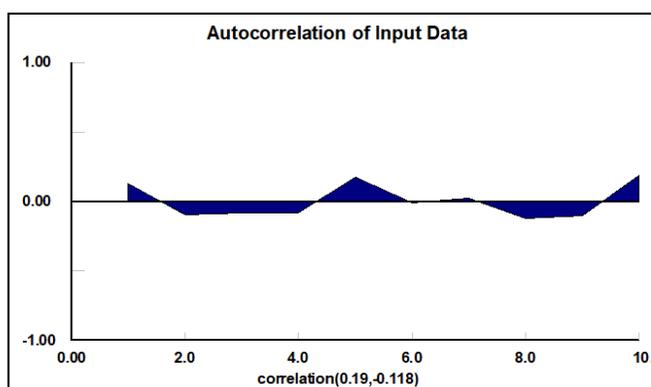


Figura 11: Gráfica de autocorrelación de toma de temperatura  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 11 muestra la gráfica de autocorrelación de la estación de toma de temperatura. Aquí se obtuvo un valor de autocorrelación de (0.19, -0.118), además, la gráfica no se encuentra cercana a ningún extremo y es social entre las regiones positivas y negativas, por lo que podemos asumir que no existe autocorrelación en los datos de esta estación.

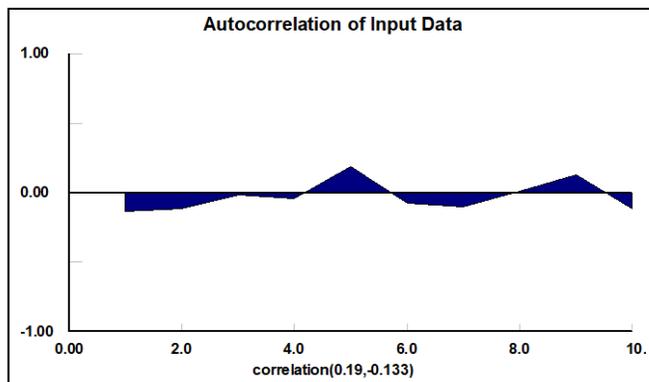


Figura 12: Gráfica de autocorrelación del lavado de manos  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

En la Figura 12 podemos observar que la gráfica de autocorrelación de la estación de lavado de manos se encuentra cercana a 0, además, tenemos que el valor de autocorrelación es de (0.19, -0.133), por lo que podemos decir que tampoco existe autocorrelación en los datos de esta estación.

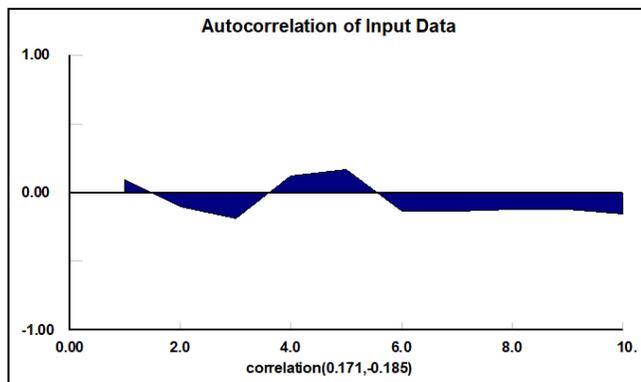


Figura 13: Gráfica de autocorrelación de la desinfección de cuerpo  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

El valor de autocorrelación de la estación de desinfección de cuerpo completo es de (0.171, -0.185). La gráfica de autocorrelación (Ver Figura 13) no se acerca a ningún extremo, en cambio, esta es cercana a cero, por lo que podemos asumir que no existe autocorrelación.

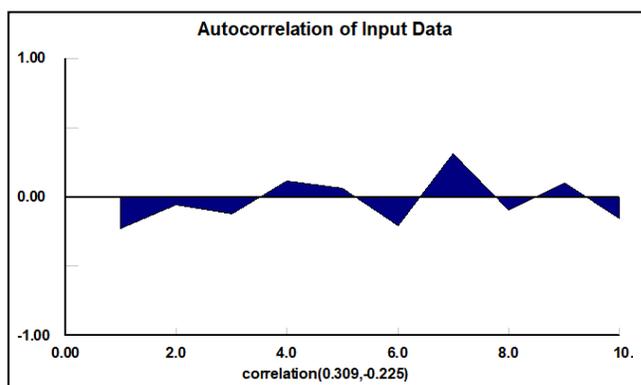


Figura 14: Gráfica de autocorrelación de la desinfección de mochila  
 FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 14 muestra que la gráfica de autocorrelación de la estación de desinfección de cuerpo completo es social entre las regiones positivas y negativas, además de que es cercana a cero y arroja un valor de autocorrelación de (0.309, -0.225), por lo que se asume que no existe autocorrelación en los datos de esta estación.

### 3.4.4 Prueba de Rachas

Los datos se sometieron también a una prueba de rachas para determinar si los datos son o no aleatorios. El programa StatFit realiza la prueba de rachas apoyado de la prueba de mediana (que determina si las muestras pertenecen a la misma población) y la prueba de punto giratorio (que examina los puntos de inflexión o puntos cambiantes para determinar la independencia de los datos), de las que se obtienen, entre otros datos, el valor p que indica si aceptamos o rechazamos la hipótesis nula.

En este sentido, a continuación se muestran los resultados de la prueba de rachas para cada estación de desinfección, teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

$$H_0 = \text{Los datos recolectados no son no aleatorios}$$

$$H_1 = \text{Los datos recolectados son no aleatorios}$$

runs test on input	
runs test (above/below median)	
data points	50
points above median	21
points below median	24
total runs	24
mean runs	23.4
standard deviation runs	3.30069
runs statistic	0.18178
level of significance	0.05
runs statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.855755
result	DO NOT REJECT
runs test (turning points)	
data points	48
turning points	28
mean turnings	31.6667
standard deviation turnings	2.8655
turnings statistic	1.27959
level of significance	0.05
turnings statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.20069
result	DO NOT REJECT

En la Figura 15 se observan los resultados de la prueba de rachas correspondientes a la prueba de mediana y la prueba del punto giratorio o punto cambiante.

El programa StatFit indica que no se debe rechazar la hipótesis nula, por lo que podemos decir que los datos son aleatorios para la estación de toma de temperatura.

Figura 15. Prueba de rachas de toma de temperatura  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

runs test on input	
<b>runs test (above/below median)</b>	
data points	50
points above median	24
points below median	24
total runs	26
mean runs	25
standard deviation runs	3.42705
runs statistic	0.291796
level of significance	0.05
runs statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.770443
result	DO NOT REJECT
<b>runs test (turning points)</b>	
data points	50
turning points	31
mean turnings	33
standard deviation turnings	2.92689
turnings statistic	0.68332
level of significance	0.05
turnings statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.494405
result	DO NOT REJECT

Figura 16: Prueba de rachas del lavado de manos  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 16 presenta los resultados de la prueba de rachas de la estación de lavado de manos.

Aquí tenemos que no existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, por lo que no podemos decir que los datos recolectados para esta estación de desinfección son no aleatorios.

runs test on input	
<b>runs test (above/below median)</b>	
data points	50
points above median	19
points below median	22
total runs	23
mean runs	21.3902
standard deviation runs	3.14393
runs statistic	0.51202
level of significance	0.05
runs statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.608637
result	DO NOT REJECT
<b>runs test (turning points)</b>	
data points	43
turning points	27
mean turnings	28.3333
standard deviation turnings	2.70596
turnings statistic	0.492739
level of significance	0.05
turnings statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.622197
result	DO NOT REJECT

Figura 17: Prueba de rachas de la sanitización de cuerpo  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

La Figura 17 corresponde a los resultados de la prueba de rachas de la estación de desinfección de cuerpo completo.

En ella se puede observar que no se debe rechazar la hipótesis nula, por lo que se puede decir que los datos son aleatorios en esta estación.

runs test on input	
runs test (above/below median)	
data points	50
points above median	25
points below median	25
total runs	29
mean runs	26
standard deviation runs	3.49927
runs statistic	0.857321
level of significance	0.05
runs statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.391267
result	DO NOT REJECT
runs test (turning points)	
data points	50
turning points	35
mean turnings	33
standard deviation turnings	2.92689
turnings statistic	0.68332
level of significance	0.05
turnings statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.494405
result	DO NOT REJECT

Por último, la Figura 18 muestra que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que los datos no son no aleatorios en la estación de desinfección de mochila y otros materiales.

Figura 18: Prueba de rachas de la sanitización de mochila  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

### 3.4.5 Pruebas de Bondad de Ajuste

La última prueba que se realizó a los datos fue la prueba de bondad de ajuste, la cual permite conocer a qué distribución de probabilidad de asemeja un conjunto de datos o variable aleatoria. Al igual que todas las pruebas y análisis anteriores, esta se ejecutó con el programa StatFit y se llevó a cabo para cada una de las estaciones de desinfección; los resultados que arrojó esta prueba fueron los siguientes:

autofit of distributions			
distribution	rank	acceptance	aicc prob
Poisson[8.32]	100	do not reject	1

Figura 19: Distribución a la que se asemeja el módulo de toma de temperatura  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

En la Figura 19 se puede observar que la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de la estación de toma de temperatura es la distribución de Poisson teniendo una media de 8.32 segundos.

autofit of distributions			
distribution	rank	acceptance	aicc prob
Poisson(121)	100	do not reject	1

Figura 20: Distribución a la que se asemeja el módulo de lavado de manos  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

En la Figura 20 se observa que, de acuerdo con el programa StatFit, la distribución que los datos de la estación de lavado de manos se asemejan nuevamente a la distribución de Poisson, teniendo una media de 121 segundos.

autofit of distributions			
distribution	rank	acceptance	aicc prob
Binomial(28, 0.668)	100	do not reject	1
Poisson(18.7)	10.2	do not reject	0

Figura 21: Distribución a la que se asemeja el módulo de desinfección de cuerpo  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

De igual forma, en la Figura 21 tenemos que los datos de la estación de desinfección de cuerpo completo se asemejan a la distribución de Poisson, con una media de 18.7 segundos.

Auto::Fit of Distributions		
distribution	rank	acceptance
Poisson(22.2)	100	do not reject

Figura 22: Distribución a la que se asemeja el módulo de desinfección de mochila  
FUENTE: Elaboración propia con el programa StatFit

Finalmente, tenemos que los datos de la estación de desinfección de mochila y cuerpo completo se asemejan a la distribución de Poisson con una media de 22.2 segundos (Ver Figura 22).

La Tabla 5 muestra un resumen de las distribuciones de probabilidad (correspondientes a funciones para datos discretos) que fueron probadas para cada estación, así como un sumario de las distribuciones elegidas y su respectiva media en segundos.

	<b>Toma de temperatura</b>	<b>Lavado de manos</b>	<b>Desinfección de cuerpo completo</b>	<b>Desinfección de mochila</b>
Distribuciones probadas	Binomial, Poisson	Binomial, Poisson	Binomial, Poisson	Binomial, Poisson
Distribución seleccionada	Poisson	Poisson	Poisson	Poisson
Media	8.32	121	18.7	22.2

Tabla 5: Resumen de las distribuciones probadas y seleccionadas en la prueba de bondad de ajuste  
FUENTE: Elaboración propia

### 3.5 Modelo de Simulación

La escuela primaria en la que se basó este estudio tiene un modelo actual con dos estaciones destinadas a la toma de temperatura, ocho lavamanos, dos estaciones de desinfección de cuerpo completo y dos estaciones de desinfección de mochila.

Esta infraestructura es suficiente para llevar a cabo el proceso de sanitización de la mitad de los estudiantes inscritos, es decir, de los 180 alumnos que atendían las clases presenciales en un inicio, sin afectar su jornada de estudio, dado que la escuela destinó una hora como parte del proceso. En este sentido, el tiempo que toma completar este proceso es de 49 minutos, lo cual no afecta su jornada dado que los estudiantes comienzan a llegar a la institución a las 8:00 am.

La simulación se llevó a cabo mediante un modelo de eventos discretos con ayuda del *software* FlexSim®, dado que este fue el mismo programa que se empleó en la Facultad para modelar sistemas y realizar proyectos similares a este, además, este tiene los elementos y características necesarias para modelar este proceso. Los elementos empleados en la simulación son:

- Fuente: Empleada para simular la llegada de los niños a la escuela.
- Filas: Empleada para simular las líneas de espera entre una estación y otra.
- Procesadores: Empleados para simular los tiempos de operación de cada estación de desinfección.

#### 3.5.1 Modelo Base

Primeramente, se realizó un modelo de simulación con las características actuales de la escuela, es decir con la infraestructura inicial para realizar el proceso de desinfección a los 180 alumnos. El modelo base (Ver Figura 23) fue validado por las autoridades de la escuela y por los dueños del proceso.

El modelo base cuenta con dos estaciones destinadas a la toma de temperatura, ocho lavamanos, dos estaciones de desinfección de cuerpo completo y dos estaciones de desinfección de mochila.

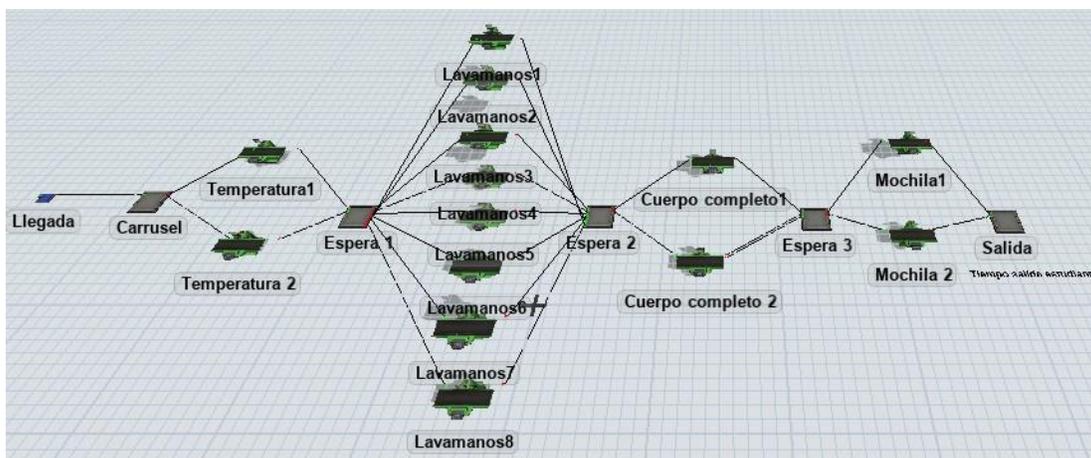


Figura 23: Modelo base en FlexSim®  
FUENTE: Elaboración propia

Tomando en cuenta que el modelo base fue validado adecuadamente, se propusieron tres diferentes escenarios para comenzar a analizar las posibles mejoras al proceso, estos escenarios se presentan en la siguiente sección.

### 3.6 Escenarios y Experimentos

Con el objetivo de monitorear los indicadores de desempeño y de determinar la distribución y número de estaciones de sanitización de los 366 alumnos inscritos al retorno a clases presenciales sin afectar su jornada de estudio, se plantearon tres diferentes escenarios, los cuales se realizaron con ayuda del *software* FlexSim®.

Cada uno de los tres escenarios contiene mejoras y modificaciones en cuanto al número de estaciones de desinfección. El número de estaciones para cada uno de los tres escenarios planteados se muestran en la Tabla 6.

	<b>Toma de temperatura</b>	<b>Lavado de manos</b>	<b>Desinfección de cuerpo completo</b>	<b>Desinfección de mochila</b>
Escenario 1	2	8	2	2
Escenario 2	2	10	2	2
Escenario 3	2	10	2	3

Tabla 6: Número de estaciones de desinfección por escenario  
FUENTE: Elaboración propia

Respecto a los experimentos realizados, cada escenario se sometió a 30 iteraciones, las cuales simularon 30 días (aproximadamente un mes) en los que se aplicó cada escenario. La finalidad de realizar estos experimentos fue obtener los tiempos de salida de los estudiantes en el sistema y poder así comparar los valores y decidir cuál sería el escenario que consuma el menor tiempo de jornada escolar.

Estos experimentos se realizaron con la herramienta Experimenter, la cual está incorporada en el programa FlexSim®. Los resultados de dichos experimentos se presentan en el Capítulo 4: Análisis de Resultados.

### 3.6.1 Escenario 1

El primer escenario se realizó tomando como base la infraestructura actual de la institución, pero considerando a los 366 alumnos en lugar de solo 180. Es decir, el escenario 1 consistió en una simulación en FlexSim® en la que se empleó la infraestructura del modelo base para verificar si la escuela sería capaz de albergar al total de la matrícula para el retorno a clases presenciales sin afectar la jornada de estudio de los alumnos.

La figura 24 muestra el modelo del escenario 1 en FlexSim®, en donde se pueden apreciar las estaciones de desinfección mencionadas en el modelo base, así como los componentes de la simulación como la fuente, la fila y los procesadores.

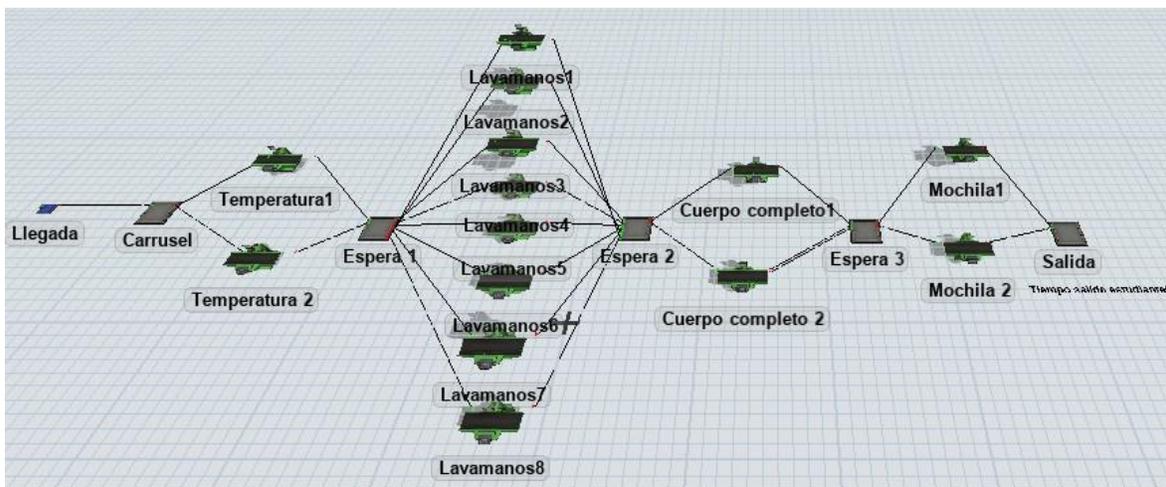


Figura 24: Escenario 1 en FlexSim®  
FUENTE: Elaboración propia

### 3.6.2 Escenario 2

Por otra parte, el escenario número 2 consistió en agregar 2 lavamanos, teniendo ahora un total de 10 lavamanos. La decisión de llevar a cabo esta mejora fue porque en el análisis de datos se identificó que este módulo es el cuello de botella del proceso.

Dicho de otra forma, las estaciones de lavado de manos son las que consumen un mayor tiempo, haciendo que los alumnos tengan un mayor tiempo de espera y retrasando el proceso, lo que terminaría afectando su jornada de estudio.

Esta mejora se implementó al adaptar 2 bebederos que la escuela tenía disponibles y los cuales no empleaban por motivos de higiene y salud dada la pandemia por COVID-19, por lo que esta mejora no representó un costo adicional a la institución.

Las estaciones restantes permanecieron igual puesto que antes de realizar otro cambio, se debe analizar el tiempo y el proceso de cada mejora. En la Figura 25 se puede observar la adición de los 2 lavamanos en el modelo de simulación.

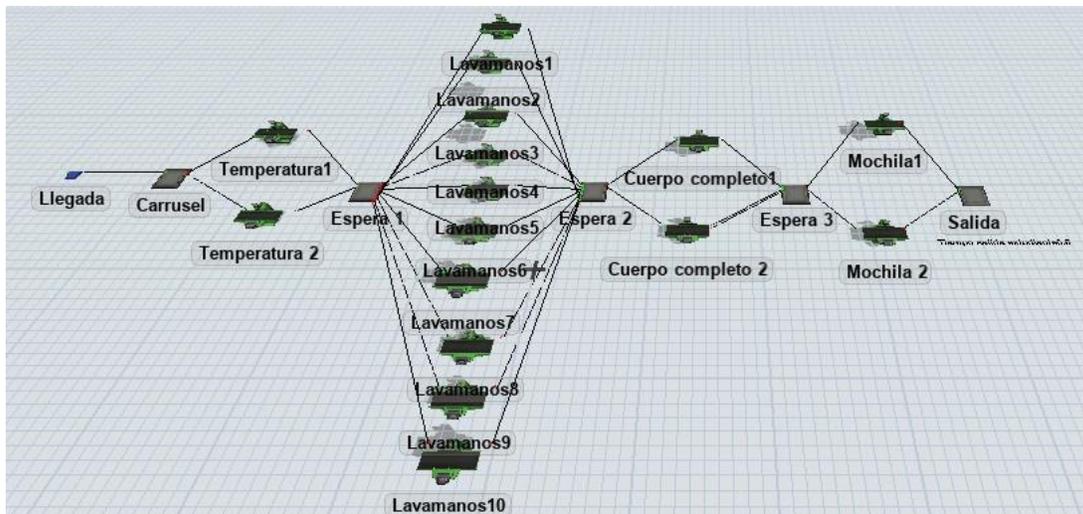


Figura 25: Escenario 2 en FlexSim®  
FUENTE: Elaboración propia

### 3.6.3 Escenario 3

Finalmente, el tercer escenario consistió en añadir una estación más al módulo de desinfección de mochila. Se tomó la decisión de llevar a cabo esta mejora debido a que esta estación tiene el segundo mayor tiempo de operación de acuerdo con el análisis de datos realizado.

Ahora bien, inicialmente se planteó agregar otra estación de lavado de manos para reducir aún más el tiempo de operación de esta estación, sin embargo, esto no fue posible debido a la falta de infraestructura de la escuela, ya que agregar más lavamanos implicaría realizar una inversión mayor.

El resto de las estaciones permanecieron igual ya que, como se mencionó anteriormente, realizar alguna otra mejora implicaría hacer inversiones fuertes para cambiar completamente la infraestructura del lugar, a lo cual la escuela no está dispuesta a hacer.

En la Figura 26 se puede observar la adición de la estación de desinfección de mochila.

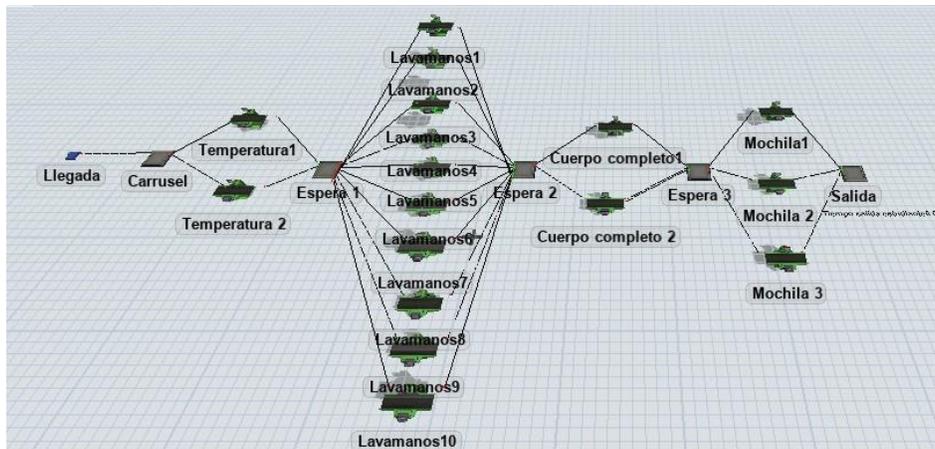


Figura 26: Escenario 3 en FlexSim®  
FUENTE: Elaboración propia

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó en el capítulo anterior, cada uno de los modelos de simulación fue sometido a 30 iteraciones para simular el pasar de un mes con cada mejora. Estas iteraciones mostraron el tiempo de salida del último estudiante en completar el proceso de desinfección durante los 30 eventos del experimento.

Se empleo un nivel de confianza del 95% para cada experimento y de este se obtuvo el tiempo máximo, mínimo, el promedio y la desviación estándar de los experimentos para cada modelo; todo esto con el objetivo de monitorear el desempeño de los sistemas modelados antes y después de realizar las mejoras.

La siguiente tabla muestra los tiempos en horas y la desviación obtenida por medio del experimentador a lo largo del proceso de desinfección para cada escenario planteado.

	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	<b>Escenario 3</b>
Tiempo máximo	1.59	1.28	0.999
Tiempo mínimo	1.57	1.26	0.992
Tiempo promedio	1.58	1.27	0.990
Desviación estándar	0.42	0.30	0.12

*Tabla 7: Resultados de los experimentos por cada escenario  
FUENTE: Elaboración propia*

Se puede observar en la Tabla 7 que, los resultados para el escenario 1 (correspondiente al modelo con la infraestructura actual pero para 366 alumnos) no son los que la institución busca, dado que el promedio del tiempo que tomaría implementar el protocolo de desinfección para la matrícula completa de la escuela es de 1.58 horas.

Esto indica que, a lo largo de un mes, con la infraestructura actual de la escuela, se estaría completando el proceso en casi 2 horas, lo cual es el doble del tiempo que la escuela designó inicialmente para implementar el protocolo, afectando significativamente la jornada de estudio de los alumnos.

Por otro lado, en el escenario 2 en donde se decidió colocar 2 lavamanos adicionales, el tiempo promedio empleado para completar el proceso de desinfección es de 1.27 horas, lo que significa que el proceso estaría terminando a las 9:16 am, recordando que el proceso comienza a la 8:00 am.

Entonces, en el escenario 2, a pesar de que el tiempo en el cuello de botella (la estación de lavado de manos) se redujo considerablemente, los estudiantes aún estarían perdiendo 16 minutos de su jornada escolar.

Finalmente, se puede observar que en el escenario 3, en donde tenemos 10 lavamanos y 3 estaciones de desinfección de mochila, el tiempo promedio en que se concluye el proceso es de 0.99 horas, es decir, el proceso estaría terminando prácticamente en una hora.

En otras palabras, considerando la aplicación del escenario 3, el proceso de desinfección de los 366 estudiantes estaría terminando a las 8:59, lo que significa que con este escenario es posible llevar a cabo y completar el proceso en el tiempo previamente establecido por las autoridades de la escuela (1 hora) sin afectar de ninguna forma la jornada de estudio de los niños.

	<b>Tiempo de salida del sistema [a.m.]</b>	<b>Tiempo de la jornada empleado [min]</b>	<b>% del tiempo de clase empleado</b>
Escenario 1	9:35	35	58.3
Escenario 2	9:16	16	26.7
Escenario 3	7:59	0	0

*Tabla 8: Resumen de resultados  
FUENTE: Elaboración propia*

Basado en la Tabla 8 en donde se muestra el resumen del análisis previo, se puede concluir que el mejor escenario a implementar es el 3, en donde tenemos 3 estaciones de toma de temperatura, 10 lavamanos, 2 estaciones de desinfección de cuerpo completo y 3 estaciones de desinfección de mochila y otros materiales, dado que el escenario 3 es el que permite realizar todo el proceso sin ocupar tiempo de la jornada de estudio además de que no requiere de una gran inversión de capital para la institución.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Específicamente en México, el retorno a clases presenciales representó un gran reto, puesto que dos sectores de la población aún no habían recibido la vacuna contra el COVID-19 para el momento en el que se anunció el retorno a las aulas. Estos sectores poblacionales corresponden a niños y adolescentes de entre 0 y 15 años, dentro de los que se encuentran, lo estudiantes de nivel primaria.

Dado que no existe literatura que aborde estos temas en México, era necesario realizar un estudio que se enfocara en el regreso a clases presenciales desde un enfoque en el que se asegurara la salud e de integridad de los alumnos al mismo tiempo de que se procurara minimizar las probabilidades de contagio al interior de las escuelas.

Desafortunadamente por el tipo de problema que esto representa, no es posible realizar pruebas directamente en las escuelas ya que esto significaría poner a los estudiantes en riesgo de ser contagiados. Por tal motivo, herramientas como la simulación resultan especialmente útiles para realizar el modelado de estos sistemas sin poner en peligro a nadie.

La simulación fue muy útil en este estudio porque ayudó a realizar el análisis del retorno a las aulas para la matrícula completa de la escuela primaria bajo estudio. Además, permitió identificar de una manera más sencilla y visual los lugares que presentaban problemas o riesgos potenciales en el sistema para posteriormente ser corregidos antes de que se iniciara el nuevo ciclo escolar.

En lo que respecta al análisis, se puede concluir que, con el modelo actual (el presentado en el escenario 1), le tomaría a la escuela 1 hora y 35 minutos realizar todo el proceso de desinfección, por lo que 35 minutos serían descontados de la jornada efectiva de estudio de los alumnos, lo que representa una clase completa. Mientras que en el escenario 2 se estarían descontando 16 minutos, lo cual, representa casi la mitad de una clase.

En la simulación se observó que la estación con mayor tiempo de procesamiento es la de lavado de manos, esto ocurre porque de acuerdo con el protocolo establecido por el Gobierno Mexicano, el correcto lavado de manos no debe durar menos de 2 minutos, lo que significa que les toma a los niños más tiempo realizar esta operación dentro de todo el proceso, generando así un cuello de botella.

De la mano con el punto anterior, se observó que existe tiempo ocioso en las estaciones restantes puesto que deben esperar a que los niños terminen de lavarse las manos para poder seguir con el proceso.

Con base en todo este análisis, a continuación se enlista una serie de recomendaciones que pueden servir para llevar a cabo este proceso de desinfección a los 366 estudiantes en el retorno a clases presenciales:

- Debido a que el lavado de manos es el cuello de botella, se recomienda agregar dos lavamanos más a la estación de lavado de manos, lo que reducirá el tiempo de desinfección en un 20%.

La manera que se sugiere para poder contar con dos lavamanos adicionales es adaptar dos bebederos con los que se cuenta actualmente y que no están siendo ocupados, para que funcionen como lavamanos.

Es importante mencionar que aún con los dos lavamanos extras, la cantidad de ellos sigue siendo insuficiente en esta parte del proceso, sin embargo, no se recomienda que se adicionen más debido a que la escuela no está dispuesta a realizar grandes inversiones de capital y no cuenta actualmente con la capacidad instalada necesaria para agregar más.

- Se recomienda también agregar una estación más de desinfección de mochila y otros materiales ya que, como vimos anteriormente, es la segunda estación con mayor tiempo de operación en el sistema.

Al añadir una estación más, la escuela puede completar el proceso de sanitización de los 366 estudiantes en el tiempo que se designó inicialmente para realizar esta actividad, que es de 1 hora, por lo que no se estaría afectando de ninguna forma la jornada de estudio.

Para llevar a cabo esta acción, es necesario colocar otro profesor que se encargue de realizar la sanitización en esta nueva estación.

- Por último, se recomienda que el resto de las áreas (toma de temperatura y desinfección de cuerpo completo) permanezcan con el mismo número de estaciones ya que agregar más estaciones no aportaría ninguna reducción significativa en el tiempo de servicio y sólo se estarían consumiendo recursos materiales y económicos.

## TRABAJO FUTURO

El trabajo de simulación presentado no es absoluto ni definitivo, dado que la situación respecto a la pandemia por COVID-19 va cambiando a lo largo del tiempo.

Por esta razón, es necesario que esta simulación se actualice de manera periódica y cada vez que se haga, es indispensable que se realice un análisis para que se pueda ir mejorando al mismo tiempo de que se encuentren mejores propuestas para llevar a cabo la desinfección de los estudiantes conforme las necesidades de este proceso vayan cambiando.

# REFERENCIAS

- Secretaría de Educación Pública. (2015). Conoce el Sistema Educativo Nacional. Gobierno de México.
- Secretaría de Educación del Estado de México. Educación Básica (en línea). Gobierno del Estado de México.
- Alvarado, M. (2021). Fortalecer filtros sanitarios en las escuelas públicas. H. Congreso del Estado de San Luis Potosí.
- Sistema de Información de Tendencias Educativas en América Latina (2018). La estructura del Sistema Educativo Mexicano. (pp. 7-9). Secretaría de Educación Pública.
- INEGI (2021). INEGI Presenta Resultados de la Encuesta Para La Medición Del Impacto COVID-19 en la Educación (ECOVID-19) 2020. Comunicado de prensa Núm. 185/21.
- Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación. (2019). Principales cifras Nacionales: Educación básica y media superior.
- Narro Robles, José; Martuscelli Quintana, Jaime y Barzana García, Eduardo (Coord.). (2012) Plan de diez años para desarrollar el Sistema Educativo Nacional. México: Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, UNAM.
- Torres, M. (2021). OCDE: México fue el país que cerró las escuelas por más tiempo debido al COVID. De Expansión Política (en línea).
- Di Domenico, L., Pullano, G., Sabbatini, C.E. et al. (2021). Modelling safe protocols for reopening schools during the COVID-19 pandemic in France. *Nat Commun* 12, 1073.
- Martijn Meeter. (2021). Primary school mathematics during the COVID-19 pandemic: No evidence of learning gaps in adaptive practicing results. *Trends in Neuroscience and Education*, Volume 25, 100163, ISSN 2211-9493.
- Paula Brumer Franceschini, Leticia Oliveira Neves. (2022). A critical review on occupant behaviour modelling for building performance simulation of naturally ventilated school buildings and potential changes due to the COVID-19 pandemic, *Energy and Buildings*. Volume 258, 111831, ISSN 0378-7788.
- C.-N. Chang, H.-Y. Chien, L. Malagon-Palacios. (2022). College reopening and community spread of COVID-19 in the United States, *Public Health*. Volume 204, Pages 70-75, ISSN 0033-3506.

- Jinwen Qiu, S. Rao Jannalamadaka, Ning Ning. (2018). Multivariate Bayesian Structural Time Series Model, *Journal of Machine Learning Research*. Volume 19.
- Emanuele Amodio, Michele Battisti, Andros Kourtellos, Giuseppe Maggio, Carmelo Massimo Maida. (2022). Schools opening and Covid-19 diffusion: Evidence from geolocalized microdata. *European Economic Review*. Volume 143, 104003, ISSN 0014-2921.
- Vijetha Koppa, Jeremy West. (2022). School reopenings, COVID-19, and employment *Economics Letters*. Volume 212, 110310, ISSN 0165-1765.
- Phanuel Tawanda Gwinji, Grant Murewanhema, Godfrey Musuka, Tafadzwa Dzinamarira. (2022). Schools re-opening and the COVID-19 response in Zimbabwe: The need for evidence-based decision making. *Public Health in Practice*. Volume 3, 100231, ISSN 2666-5352.
- Al-Zoughool, M., Oraby, T., Vainio, H. et al. (2022). Using a stochastic continuous-time Markov chain model to examine alternative timing and duration of the COVID-19 lockdown in Kuwait: what can be done now?. *Arch Public Health* 80, 22.
- Lasser, J., Sorger, J., Richter, L. et al. (2022). Assessing the impact of SARS-CoV-2 prevention measures in Austrian schools using agent-based simulations and cluster tracing data. *Nat Commun* 13, 554.
- Hummel, A., Ergai, A., Spiva, L. et al. (2022). Rapid design and implementation of a UVC decontamination room. *Sci Rep* 12, 835.
- Kierrat, Wojciech; Augustyn, Werinika; Koper, Piotr. Et al. (2020). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(20), 7396 EISSN 1660-4601, Published by MDPI.
- Matteo Lombini, Emiliano Diolaiti, Adriano De Rosa, Luigi Lessio, Giovanni Pareschi, Andrea Bianco, Fausto Cortecchia, Mauro Fiorini, Giulia Fiorini, Giuseppe Malaguti, and Alessio Zanutta, "Design of optical cavity for air sanitification through ultraviolet germicidal irradiation," *Opt. Express* 29, 18688-18704 (2021).
- Banks, J. (1999). *Introduction to Simulation*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Atlanta, GA 30067, U.S.A.
- Banks, J., Gibson, R. (1997). 10 Rules for determining when simulation is not appropriate. *IIE Solutions*. Vol. 29. Issue 9. P. 30. ISSN:1085-1259.
- Brailsford, S.C., Churilov, L., & Dangerfield, B.C. (2014). Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making.
- Sturrock, D. T., (2010). Tips for successful practice of simulation. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.

- Leemis, L. (1999). Simulation input Model. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference.
- Harrell, Ghosh, Bowden. (2004). Simulation Using ProModel. The McGraw-Hill Company. Segunda Edición.
- Brailsford, S., Leonid, C., Dangerfield, B. (2014). Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making. Editorial Wiley. Primera edición.
- Miranda, J. (2017). Autocorrelación. (en línea). Recuperado de Todo Econometría.
- Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa, 5taEdición, Eppen-Gould-Schmidt-Moore-Weatherford, Prentice Hall
- Ramírez, V. (2020). Aplicación de simulación Monte Carlo en un sistema de Inventarios Dinámico.
- Martínez, M. (2010). La distribución Poisson. Diciembre 01, 2021, de Universidad Politécnica de Valencia
- Villaseñor-Alva, J. A., & Luna-Espinoza, I. (2005). Pruebas de autocorrelación e independencia y su relación con la hipótesis de martingala. *Agrociencia*, 39(1), 65-79.