

# ESTUDIO SOBRE LOS EFECTOS DE VIRTUALIZAR EL CAMPUS COMO ESTRATEGIA PARA MINIMIZAR LOS CONTAGIOS POR SARS-COV-2 PRODUCIDOS EN LOS ESPACIOS ACADÉMICOS

*A mathematical modeling approach to study on campus transmission dynamics of SARS-CoV-2*

Juan Manuel Cordovez

Director del Grupo de Investigación en Biología Matemática y Computacional (BIOMAC).  
Director y profesor asociado, Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad de los Andes.  
Contacto: jucordov@uniandes.edu.co

## Resumen

El efecto de las medidas no farmacológicas para la contención de la propagación del SARS-CoV-2 ha causado impactos negativos, especialmente en el sector educación. La reactivación de colegios y universidades se entiende como de alto riesgo para la potenciación de los contagios. Con ayuda de la modelación matemática, el presente trabajo busca entender los posibles mecanismos de propagación del virus en un entorno académico y cuantificar los contagios atribuibles a la participación en actividades académicas. Se construyó un modelo de agentes y ecuaciones diferenciales estocásticas que, junto con la información académica de la Universidad de los Andes para el semestre 2020-2, sirven para simular la dinámica de contagios en la institución. El modelo sugiere que la semi-presencialidad combinada con la vigilancia epidemiológica puede producir condiciones muy seguras que permiten operar sin contribuir de forma significativa a los contagios de COVID en la ciudad de Bogotá.

**Palabras clave:** SARS-CoV-2, propagación de virus, dinámica de contagios, contagios de COVID, reactivación de actividades académica.

## Abstract

*The effect of non-pharmacological interventions to contain the spread of SARS-CoV-2 have caused negative impacts, especially in education. Re-opening schools and universities is regarded as a high risk scenario. This paper seeks to understand, with the help of mathematical modeling, possible mechanisms through which the virus could spread in an academic environment and to quantify contagions attributable to participating in academic activities. To simulate the dynamics of contagion at the University, an agent-based mathematical model that incorporated stochastic differential equations was built using academic data for the University's 2020-2 semester. The model suggests that hybrid-attendance combined with epidemiological surveillance can produce very safe operating conditions without significantly contributing towards more COVID infections in the city of Bogotá.*

**Key words:** SARS-CoV-2, virus spread, contagion dynamics, COVID infections, reactivation of academic activities, re-opening schools and universities.

## Introducción

Diferentes países han implementado diversas estrategias no farmacológicas de contención y mitigación del virus SARS-CoV-2; mismas que, sin duda, han servido para disminuir el contagio y las muertes (Wang Z, 2020). Sin embargo, estas estrategias pusieron en pausa actividades económicas que amenazan la estabilidad de la sociedad. En particular, el sector educación ha pagado un precio alto en medio de las medidas de prevención. Los colegios, universidades y las guarderías para la pequeña infancia han visto completamente restringida su operación. Los costos más altos son sociales: pérdida de tiempo, atraso en el aprendizaje, disruptión de las dinámicas de los hogares, alteración de la salud (mental y física) (Pfefferbaum, 2020). También hay un costo económico especialmente difícil de asumir para las instituciones privadas. Debido a esto, el Gobierno Nacional emitió un decreto que permitió la reactivación gradual a partir del 1 de septiembre de 2020. Algunas Universidades planearon su segundo semestre del 2020 casi enteramente virtual, pero algunas otras han pensado en estrategias que combinan presencialidad y virtualidad. En un escenario de semi-presencialidad es importante establecer cuáles podrían ser las consecuencias de reunir a un grupo de personas en el campus en términos de contagios por SARS-CoV-2.

La Universidad de los Andes propuso un modelo semi-presencial con algunos cursos desarrollándose enteramente de manera virtual y otros con presencialidad en el campus a partir del mes de octubre. Los cursos que se escogieron para virtualizar fueron aquellos que representaban un mayor riesgo de contagio debido a su gran tamaño o por el número de estudiantes que compartían con otros cursos de la Universidad (*degree*). Bajo estas circunstancias, con la ayuda de modelos matemáticos decidimos explorar las posibles consecuencias (medidas como el número de contagios dentro de la universidad) producto de la estrategia de virtualización y compararla con un escenario hipotético donde la institución hubiera

operado de forma normal. Adicionalmente, exploramos el efecto que tiene la vigilancia epidemiológica, entendida como la detección y prevención de la entrada de personas contagiadas a Los Andes.

## Metodología

El modelo propuesto combina modelación por agentes y ecuaciones diferenciales estocásticas. La modelación por agentes permite describir los aspectos relevantes de cada estudiante de la Universidad. A la fecha, se han propuesto varios modelos para entender contagios en el campus (Hannah Christensen, 2020) (Weeden, 2020) (Molly Borowiak, 2020). Para cada estudiante (agente) consideramos el programa al que pertenece, los cursos en los que está inscrito, la hora a la que se dicta el curso y el salón en el que se lleva a cabo. Las ecuaciones diferenciales se usan para entender la evolución de la infección incluyendo la aparición de casos críticos. La estocasticidad permite incluir la sensibilidad intrínseca de estos modelos a las condiciones iniciales y la configuración espacial. Cabe resaltar, que todos los resultados provienen de simulaciones de este mismo modelo.

Se trabajó con la población de los estudiantes inscritos en el semestre 2020-2. No se consideran administrativos ni profesores. Se investigan solo los contagios generados en el campus, pero se incluye la posibilidad de contagios por fuera de la Universidad, modelado como una tasa de contagios constante producida por la ciudad de Bogotá. No se consideran los que ocurren en espacios entre salones, como la biblioteca, las áreas comunes o cafeterías. La simulación se hace por ocho semanas comenzando el 1 de octubre.

Para el semestre 2020- 2 la Universidad tiene 19.209 estudiantes inscritos que pertenecen a 33 programas (agrupando todas las licenciaturas en una y los programas de posgrado en otro) con una cartelera de

5245 clases, de las cuales 1058 tienen componente presencial (contando las secciones de un mismo curso como clases distintas). La Universidad tiene una infraestructura de 360 salones (repartidos en 36 bloques, pero este semestre solo se emplean 149).

Los agentes en el modelo siguen las siguientes reglas:

- I. Cada estudiante tiene un horario independiente con clases que se dictan a cierta hora y en determinado salón.
- II. Se seleccionan todas las clases que concurren para cada franja de 30 minutos, empezando las 6:30 am y hasta 9:00 pm de cada día, y se aplica el modelo epidemiológico para cada grupo de estudiantes que se encuentran juntos en el mismo espacio físico (salón). Lo anterior, se realiza utilizando la cartelera de clases.
- III. Se repite este proceso para cada día de la semana de lunes a sábado. Se consideran contagios por fuera del campus a una tasa fija.
- IV. Se repite este proceso por ocho semanas hasta completar el semestre académico.
- V. Todos los estudiantes atienden presencialmente sus clases a no ser de que: 1) la clase sea virtual o 2) el estudiante este infectado (y exista vigilancia epidemiológica en el campus) y 3) esté hospitalizado.
- VI. Las clases que se escogen para virtualizar corresponden a aquellas que la oficina de admisiones y registro reportó como 'virtual'.

El modelo epidemiológico divide la población en: Susceptibles (S), Expuestos (E) –personas que han adquirido el virus, pero es muy temprano para ser identificadas por síntomas o pruebas, pueden contagiar en tasas menores–, Infectados (personas con carga viral alta, pueden ser asintomáticos (A) o sintomáticos leves a graves (I), Hospitalizados (H), Hospitalizados en UCI (U), Recuperados (R) –superan la infección y desarrollan anticuerpos, no pueden volver a infectarse– y Muertos (D). Los parámetros que se usan en el modelo corresponden a los estimados para la ciudad de Bogotá usando la misma estructura epidemiológica (ref).

Las condiciones iniciales del modelo para todas las simulaciones fueron: 30 expuestos y 30 infectados (24

asintomáticos y 6 sintomáticos) y 1920 recuperados, no se consideran hospitalizaciones ni muertes. Estos números son consistentes con el supuesto de que la población de estudiantes tiene las mismas proporciones que las de la ciudad de Bogotá (muestra representativa en cuanto a infectados), hospitalizados y recuperados. Se asume una proporción de 0,4 % de infectados y del 10 % de recuperados. Los estudiantes de cada categoría se escogen de forma aleatoria.

Se corrieron las siguientes simulaciones: 1. La Universidad operando con todas sus clases presenciales y sin vigilancia epidemiológica, 2. La Universidad operando con todas sus clases presenciales y con vigilancia epidemiológica y 3. La Universidad operando con el esquema de virtualización escogido. No se ensayó el sistema escogido con vigilancia porque los resultados de la virtualización son muy positivos. Para cada simulación se grafica el número de casos diarios para el periodo de ocho semanas con intervalos de confianza del 95 % y el número acumulado de infecciones originadas en el campus. También se identifican los cursos que mayor contribución hacen a los contagios y se explora la evolución de los contagios (quién contagia a quién). Cada simulación tiene cinco realizaciones (con diferentes escenarios de infección inicial).

## Resultados

Las simulaciones sugieren que, de haber operado el campus de forma presencial (empezando el 1 de octubre y hasta el 1 de diciembre) usando como condiciones iniciales las fracciones estimadas de personas infectadas para la ciudad de Bogotá, se hubieran generado del orden de 300 infecciones en el periodo. Contagios autóctonos, es decir, que se originaron dentro del campus en un espacio de académico. De tener todas las clases operando de forma presencial, pero implementando vigilancia epidemiológica, es decir, removiendo los individuos infectados, las infecciones se podrían reducir hasta casi una cuarta parte. La razón por la cual no se reducen a cero las infecciones es porque en el modelo se permite que los individuos expuestos circulen, asumiendo que su carga viral y síntomas son difíciles de detectar.

Antes de discutir a fondo los resultados del modelo, se deben tener en cuenta sus limitaciones:

- I. Los parámetros son estimados a partir de los ajustes a las curvas epidemiológicas de la ciudad de Bogotá. El grupo poblacional asociado a la Universidad podría exhibir un comportamiento ligeramente distinto.
- II. No se consideran otras actividades de las personas que asisten al campus, como caminar, comer, o conversaciones al aire libre. Todas estas son actividades que aumentan las posibilidades de contagio.
- III. En las simulaciones presentadas no se incluyen tasas diferenciales de infección y muerte en los grupos de edades o por género.
- IV. Se asume que todas las personas en un mismo recinto tienen la misma posibilidad de contagio (mezcla completa).
- V. La latencia entre el contagio y el resultado positivo de la prueba no se tiene en cuenta.

Al simular con el modelo el esquema de virtualización escogido para lo restante del semestre 2020, se observa que los contagios que se podrían generar son muy pocos, el modelo estima menos de diez contagios producidos dentro del campus en sesiones de clases. Este resultado es compatible con un esquema de virtualización generalizado con pocos cursos con sesiones presenciales en salones donde se garantizaría el distanciamiento social.

Estos resultados se ven en la Figura 1, donde se pueden comparar los tres escenarios simulados empezando en octubre 1 y por ocho semanas, todos los escenarios comienzan con los mismos valores de condiciones iniciales (pero no necesariamente los mismos estudiantes en cada categoría). Las cinco realizaciones de cada escenario se usan para producir los intervalos de confianza mostrados como sombras en la figura. Se puede observar el valor de casos acumulados al final del periodo para cada escenario.

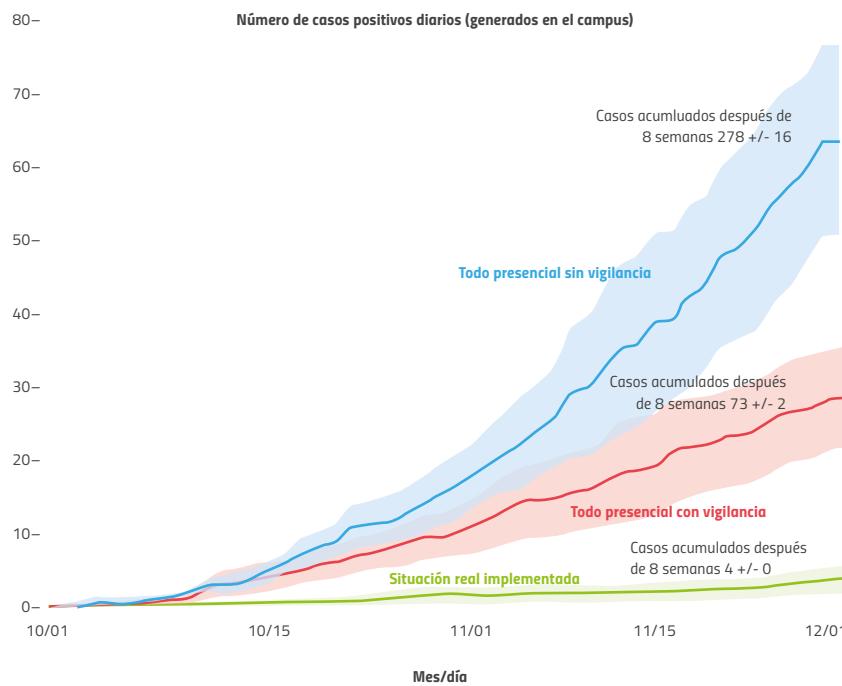


Figura 1. Número de casos positivos diarios y acumulados para el periodo para cada escenario.

Cinco realizaciones de cada uno con condiciones iniciales de 30 expuestos, 24 asintomáticos, 6 sintomáticos y 1920 recuperados. Los estudiantes de cada categoría se escogen de forma aleatoria.

Una pregunta importante y de mucho valor es identificar los cursos que más aportan a las infecciones. En la Figura 2 mostramos para cada escenario los cinco cursos que más contribuyeron a generar infecciones en el campus. La medida de contribución usada fue contar cuántas veces el curso fue el espacio en el que un estudiante contagió a otro. El valor es el acumulado para las cinco realizaciones. Es importante aclarar que, en cada realización el

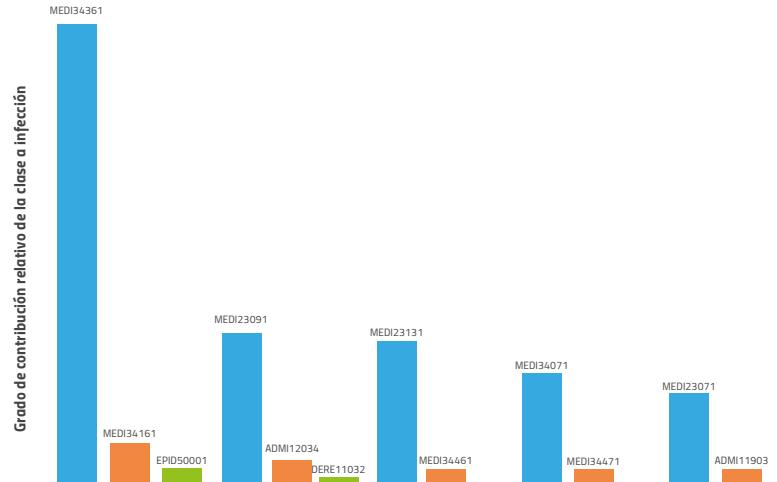
número de personas infectadas es el mismo, pero son diferentes estudiantes inscritos en diferentes cursos; de esta manera, el desarrollo de la infección en cada realización puede dar cursos diferentes dependiendo del horario que tengan inscritos los estudiantes seleccionados de forma aleatoria. En la Figura 2, el caso real, es decir, el de virtualización implementado en el campus, solo arrojó dos cursos que en las cinco realizaciones contribuyeron a infecciones.

**Figura 2.** Cursos que más contribuyen a la red de contagios (sacada de las cinco realizaciones combinadas).

5 clases que más contribuyen a generar infecciones en el periodo de estudio para cada escenario

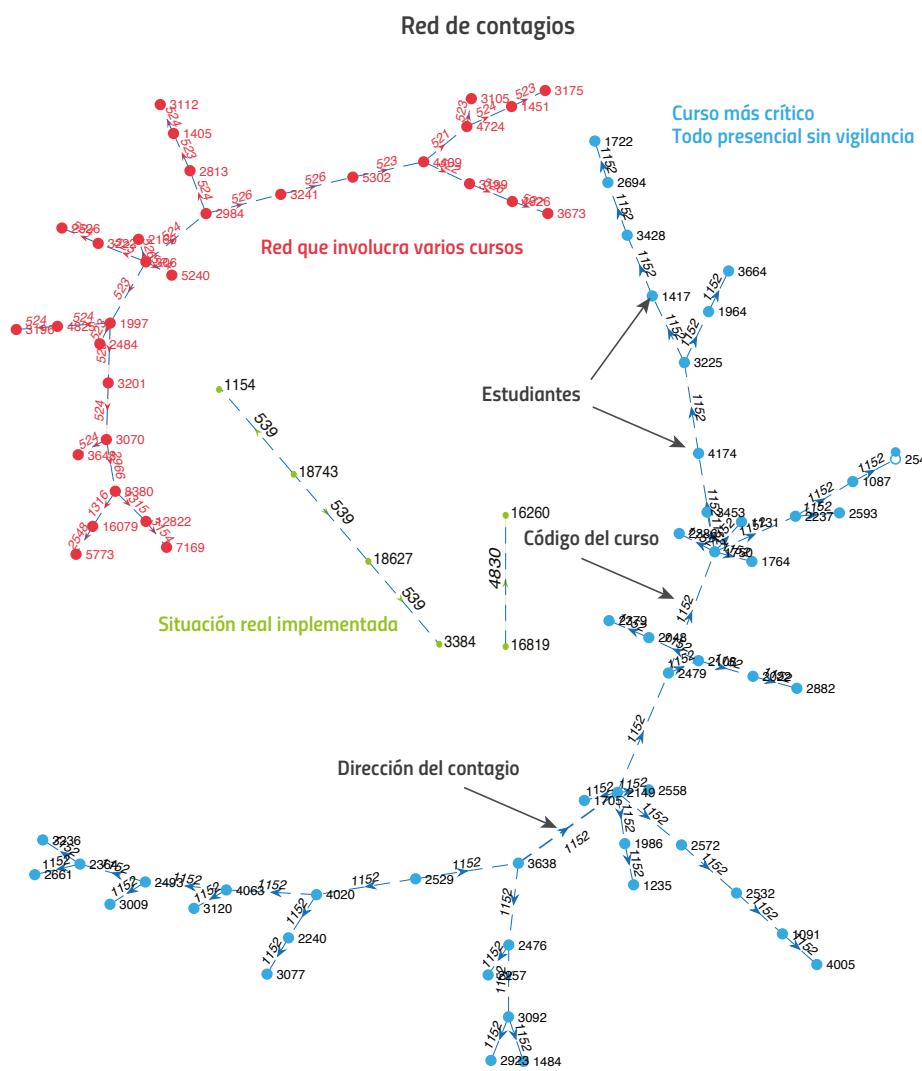
- Todo presencial sin vigilancia
- Todo presencial con vigilancia
- Situación real implementada

Los barros azules corresponden al caso de todos los cursos presenciales sin vigilancia, las barra naranjas corresponden al caso de todos los cursos presenciales con vigilancia, y las barra verdes corresponden al caso real. En el caso real solo dos cursos contribuyen a los contagios, en los otros dos escenarios se escogieron los cinco cursos que más contribuyeron. El alto de la barra representa la importancia relativa del curso en la red de contagios. Es importante notar que, en la realidad, estos cursos no son problemáticos, sino que fueron el resultado de las condiciones iniciales. (Ver texto para aclaración)



Para entender la forma en la que ocurren las infecciones es posible generar una red de contagios que revele el papel de los cursos. La Figura 3, en color azul, se muestra el caso de una subred de contagios en la que el curso más relevante en el escenario presencial sin vigilancia aparece repetidas veces. Cada nodo es un estudiante, identificado con un número (generado de forma aleatoria para el modelo). Lo que une a un estudiante con el siguiente es una flecha identificada con el código del curso (identificación del modelo) y su dirección muestra quién infectó a quién. De la misma

manera, pero en verde, se muestra el escenario real (para una realización) y la red de contagios involucra solo dos cursos y cinco estudiantes. Se puede observar cómo un único curso (código 539) es el espacio donde ocurrieron tres infecciones ocasionadas por el estudiante No. 18743. En color rojo aparece una subred que pertenece también al escenario presencial sin vigilancia, pero que involucra más de un curso. Se puede observar que aparecen los cursos 521, 523, 524 y 525, por mencionar algunos, en una cadena de contagios.



**Figura 3.** Red de contagios (tomada de una realización).

Los puntos azules corresponden a estudiantes contagiados, principalmente en el curso 1152 y en el escenario de todos los cursos presenciales sin vigilancia. Cada enlace corresponde al código del curso con la flecha que indica la dirección del contagio. Los puntos rojos corresponden a estudiantes contagiados en el escenario todos los cursos presenciales con vigilancia, pero con una red que involucra varios cursos (ver números en los enlaces). Los puntos verdes corresponden a estudiantes contagiados en el escenario real. En el caso real solo dos cursos contribuyen a los contagios (539 y 4830).

## Discusión

Los resultados nos permiten concluir que la virtualización de las clases propuesta permite, prácticamente, prevenir los contagios que se hubieran presentado en el campus en un escenario de presencialidad. Es claro que el impacto de la vigilancia en el número de casos es muy alta, y hace pensar que sería posible operar el campus con una presencialidad mayor si se acompaña de estrategias de identificación y aislamiento de los casos. Una utilidad de este ejercicio radica en la posibilidad de detectar *a priori* cursos que podrían aportar en la red de contagios. Para el caso del semestre 2020-2 se encuentra que

solo dos cursos, en las cinco realizaciones del escenario real, resultaron con casos generados dentro del campus. Estos cursos son EPID5000 y DERE1132. De este resultado sorprendente (solo dos cursos de los 1058 semi-presenciales) se desprende un resultado poco intuitivo pero fácil de entender. Comparados con la oferta, los cursos que participan en las redes de contagios son pocos. La razón es clara: al haber pocos estudiantes infectados inicialmente (solo un grupo de 30 cursos tienen infectados al principio) la posibilidad de que las infecciones en el periodo de tiempo considerado lleguen a muchos cursos de la Universidad es baja; las infecciones llegan a los cursos que están conectados

directamente con los inicialmente infectados. En el escenario real, en el transcurso del semestre, existe gente contagiada en el campus como consecuencia de los contagios fuera de la Universidad, pero el esquema no amplifica esta población infectada. Los dos cursos encontrados corresponden a la única realización que produjo nuevas infecciones y estos dos cursos hacían parte del grupo de cursos con contagios iniciales (en las otras simulaciones los estudiantes infectados estaban en clases virtuales).

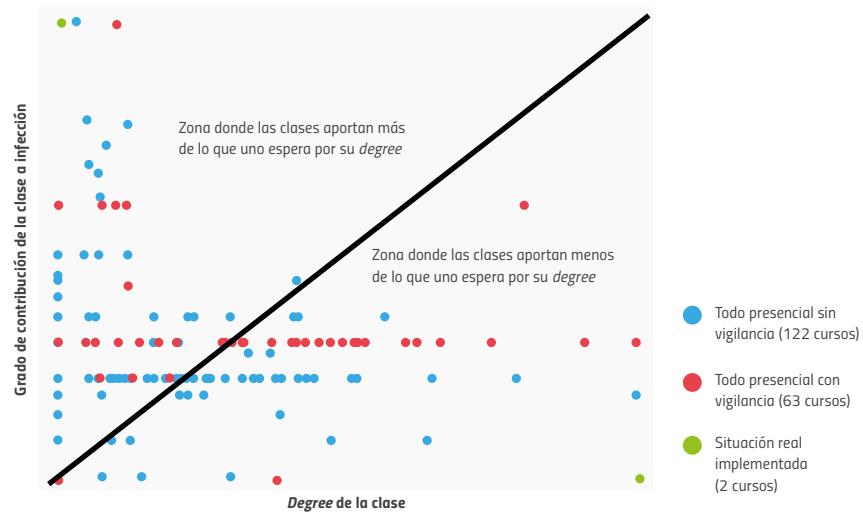
De las simulaciones resulta un hallazgo bastante interesante: las redes de contagios que se observan al finalizar el periodo son fragmentadas en subredes que, en ocasiones, son dominadas por un solo curso, pero en otras participan varios. Este resultado contrasta con el sentido común que indica que la red de contagios fuera una sola, densa y altamente interconectada. Posiblemente, de cada estudiante semilla (que parte con la infección desde el comienzo) se genera un árbol de contagios que crece en una clase que propicie altas densidades y largos periodos de tiempo. No corrimos simulaciones más largas de 16 semanas, posiblemente en simulaciones más largas las subredes empiecen a conectarse y para el final todo resulte en una sola red compacta. Esto sugiere que el rastreo es muy eficiente en prevenir contagios, dado que toma tiempo que las pequeñas subredes se junten. Estas simulaciones también permiten identificar los cursos por los que posiblemente se expandiría la red de contagios.

En el proceso de construcción del modelo se producen observaciones interesantes. Por ejemplo, el ejercicio de capturar para cada estudiante su horario y crear un algoritmo que reproduce su jornada académica resulta en la posibilidad de establecer quién se encuentra con quién o qué clases comparten estudiantes. Cuando se revisa clase por clase y se cuentan los estudiantes que comparten cada clase con cualquiera otra de la Universidad surge una red donde cada nodo es una clase y cada enlace une clases que comparten estudiantes. El peso del enlace corresponde al número de estudiantes que comparten. Esto, en teoría de grafos, se conoce como el grado (*degree*) del nodo.

De esta manera, un curso poco numeroso puede ser más “peligroso” epidemiológicamente si se considera que está conectado con muchos cursos. Si se ubica a una persona infectada en un curso con un *degree* alto, se espera que el curso genere más contagios que si un estudiante ingresa a un curso menos conectado. Con esta línea de pensamiento se podría pensar que construir este grafo y calcular el *degree* de cada nodo podría ser una manera eficiente de aproximarse a decidir qué cursos son los que se podrían virtualizar o vigilar para prevenir contagios. Para investigar esto creamos una figura en la que se grafica el *degree* del curso contra el aporte del curso a la red de contagios para los tres escenarios explorados (ver Figura 4).

**Figura 4.** Relación entre el *degree* del curso y la participación del curso en la red de contagios.

Los puntos azules corresponden a cursos en los que ocurrieron contagios en el escenario todos los cursos presenciales sin vigilancia. Los puntos rojos corresponden a cursos en los que ocurrieron contagios en el escenario de todos los cursos presenciales con vigilancia. Los puntos verdes corresponden a cursos en los que ocurrieron contagios en el escenario real. En el caso real solo dos cursos contribuyen a los contagios y en el caso de todos presenciales sin vigilancia, 122 cursos.



Es sorprendente encontrar que el *degree* no se correlaciona con el rol del curso. Una explicación para esto tiene que ver con lo expresado anteriormente y es el efecto de las condiciones iniciales. Para el periodo de tiempo estudiado los cursos que juegan un papel importante en los contagios son los que empiezan con las infecciones más allá de su *degree* o tamaño. Este resultado pone de manifiesto la importancia de la vigilancia: detectar los casos antes de empezar las clases es más importante que virtualizar los cursos con alto *degree*.

## Conclusiones

El esquema de virtualización propuesto para la Universidad sugiere que habría muy pocos contagios originados por las clases con componente presencial. Los cursos riesgosos serían solo aquellos que reciban gente infectada el primer día.

Virtualizar el campus reduce las infecciones drásticamente. Se sugiere que, en un periodo de ocho semanas, un campus presencial podría generar del orden de 350 contagios autóctonos (producidos en espacios de clase). En el esquema propuesto se reduce a una decena.

La razón por la cual en el escenario real se producen pocos contagios en el campus es porque por azar solo algunos estudiantes infectados (proporcional a los valores de Bogotá) estarán matriculados en cursos semipresenciales y la mayoría en clases virtuales. Esto aclara el porqué en 1150 clases semipresenciales solo dos (en cinco realizaciones) contribuyeron a contagios.

En general, para un periodo de un semestre, con las medidas de protección y distanciamiento, y dada una cartelera con cursos presenciales, se debe tener cuidado con establecer en el día cero quiénes entran infectados, porque esos cursos son los que harán parte de la red de contagios. En otras palabras, el *degree* del curso no se puede usar como un mecanismo de identificación a priori de cursos que requieran especial atención.

En contraste con el punto anterior, usar el *degree* como criterio para escoger los cursos a virtualizar es sensato en la medida en que disminuye la fuerza de entrada del virus en el campus. Es decir, los contagios se deben dar en cursos menos conectados.

Los cursos identificados en estas simulaciones como problemáticos realmente no representan un peligro real, lo son en las simulaciones como consecuencia de que en ellos iniciaron los contagios por cuestiones de azar. ●

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pfefferbaum, B. (2020). Mental Health and the Covid-19 Pandemic. *New England Journal of Medicine*, 510-512.
- Hannah Christensen, K. T. (2020). COVID-19 transmission in a university setting: a rapid review of modelling studies. *medRxiv*, <https://doi.org/10.1101/2020.09.07.20189688>.
- Weeden, K. A. (2020). The Small-World Network of College Classes: Implications for Epidemic Spread on a University Campus. *Sociological Science*, 222-241.
- Molly Borowiak, F. N.-R. (2020). Controlling the spread of COVID-19 on college campuses. *arXiv*, arXiv:2008.07293v1.
- Wang Z, H. T. (2020). Active quarantine measures are the primary means to reduce the fatality rate of COVID-19. *Bull World Health Organ.*, <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.20.255844>.