



RESILIENCIA Y VULNERABILIDAD EN LA RED DE COLABORACIÓN CIENTÍFICA CUBA-EE.UU.: UN ANÁLISIS DE REDES COMPLEJAS

RESILIENCE AND VULNERABILITY IN THE CUBA-U.S. SCIENTIFIC COLLABORATION NETWORK: A COMPLEX NETWORK ANALYSIS

Guillermo Armando Ronda-Pupo
Universidad Católica del Norte, Chile
gronda@ucn.cl
<https://orcid.org/0000-0002-9049-8249>

Recibido: 22 de junio 2025

Revisado: 11 agosto de 2025

Aprobado: 27 de octubre de 2025

Cómo citar: Ronda-Pupo, G. A. (2026). Resiliencia y vulnerabilidad en la red de colaboración científica Cuba-EE.UU.: un análisis de redes complejas. *Bibliotecas. Anales de Investigación*, 22(1), 1-16

RESUMEN

Objetivo: Evaluar la resiliencia de la red de colaboración científica entre Cuba y Estados Unidos, analizando su estructura, conectividad y vulnerabilidad ante restricciones políticas y eliminación de nodos clave. Se identifican los principales actores y su dependencia de hubs estratégicos. **Diseño/Metodología/Enfoque:** Se aplicó análisis de redes complejas utilizando métricas como umbral de percolación, robustez estructural, coeficiente de clustering, eficiencia global, modularidad y centralidad de hubs y autoridades. Se comparó la resiliencia de la red real con un modelo nulo y se realizaron simulaciones para evaluar la fragmentación ante fallos aleatorios y ataques dirigidos. **Resultados/Discusión:** La red muestra alta conectividad y eficiencia (grado promedio: 65.22; eficiencia global: 0.738), indicando una colaboración activa. Sin embargo, la baja robustez estructural (0.435) y la dependencia de hubs estratégicos la hacen vulnerable a ataques dirigidos. EE.UU., Brasil y México emergen como los principales facilitadores de la cooperación cubana. Se identificó un umbral de percolación del 47.47%, lo que indica resistencia a fallos aleatorios pero fragilidad ante la eliminación de nodos clave. **Conclusiones:** La red ha demostrado resiliencia, pero su estabilidad depende de actores clave. La fragmentación abrupta observada en las simulaciones resalta la necesidad de fortalecer la interconexión entre comunidades científicas y diversificar las colaboraciones para reducir la dependencia de nodos altamente conectados. **Originalidad/Valor:** Este estudio ofrece un análisis novedoso de la resiliencia estructural de la red científica Cuba-EE.UU., aportando perspectivas clave para la diplomacia científica y estrategias para garantizar la sostenibilidad de la colaboración internacional en contextos geopolíticamente adversos.

PALABRAS CLAVE: Análisis de Redes; Colaboración científica; Resiliencia; Diplomacia científica; Umbral de percolación

ABSTRACT

Objective: To assess the resilience of the scientific collaboration network between Cuba and the United States by analyzing its structure, connectivity, and vulnerability to political restrictions and node removals. The study identifies key actors and their dependence on strategic hubs. **Design/Methodology/Approach:** A complex network analysis was conducted using metrics such as percolation threshold, structural robustness, clustering coefficient, global efficiency, modularity, and hub and authority centrality. The resilience of the real network was compared with a null model, and simulations were performed to evaluate fragmentation under random failures and targeted attacks. **Results/Discussion:** The network exhibits high connectivity and efficiency (average degree: 65.22; global efficiency: 0.738), indicating an active scientific collaboration. However, its low structural robustness (0.435) and dependence on strategic hubs make it vulnerable to targeted disruptions. The United States, Brazil, and Mexico emerge as the main facilitators of Cuban scientific cooperation. A percolation threshold of 47.47% was identified, suggesting that while the network is moderately resistant to random failures, it is highly susceptible to the removal of key nodes. **Conclusions:** The network has demonstrated resilience despite political restrictions, but its stability depends on a small group of key actors. The observed abrupt fragmentation in the simulations highlights the need to strengthen interconnections among scientific communities and diversify collaborations to reduce reliance on highly connected nodes. **Originality/Value:** This study provides a novel analysis of the structural resilience of the Cuba-U.S. scientific collaboration network, offering key insights for science diplomacy and strategies to ensure the sustainability of international cooperation in geopolitically challenging contexts.

KEYWORDS: Network Analysis; Scientific collaboration; Resilience; Science diplomacy; Percolation threshold.

INTRODUCCIÓN

La colaboración científica entre Cuba y los Estados Unidos ha oscilado entre intereses compartidos en ciencia y fuertes restricciones políticas (Cao, 2015; Echegoyen, 2002; Fink et al., 2014; Lempinen, 2009; Pastrana & Clegg, 2008). Esta dualidad ha marcado su evolución durante décadas, la interacción entre científicos de ambos países ha fluctuado entre periodos de apertura y restricciones, reflejando el contexto político de las relaciones bilaterales (Ronda-Pupo, 2021). Sin embargo, a pesar de las limitaciones impuestas por el embargo y otros factores geopolíticos, la red de colaboración científica entre ambos países ha demostrado resiliencia y ha evolucionado a través de mecanismos alternativos de cooperación, incluyendo intermediarios internacionales, eventos científicos y diplomacia científica (DeWeerd, 2001; Fink et al., 2014; Pastrana & Clegg, 2008).

Desde el restablecimiento parcial de las relaciones diplomáticas en 2014, diversas iniciativas han intentado fomentar la cooperación en salud pública, biotecnología, química, meteorología y otras áreas estratégicas (Chapman et al., 2018; Pastrana, 2015). Estas iniciativas han sido impulsadas tanto por organizaciones académicas y científicas como por esfuerzos individuales de investigadores que han desarrollado vínculos a pesar de las restricciones gubernamentales (Demain, 2009; Keck, 2016). Sin embargo, los avances logrados han estado sujetos a cambios en la política exterior de los EE.UU. y a la estabilidad de los acuerdos bilaterales (Anthes et al., 2015; Heger, 2016; O'Connell et al., 2018).

Uno de los mecanismos que ha permitido la continuidad de esta cooperación ha sido el uso de terceros países como puente para la colaboración. Estudios recientes sugieren que México ha desempeñado un papel fundamental como intermediario en la conexión entre científicos cubanos y estadounidenses, facilitando la publicación conjunta de artículos en plataformas internacionales (Ronda-Pupo, 2023). Asimismo, otras estrategias como la diplomacia científica y las alianzas entre instituciones han servido para contrarrestar los efectos del aislamiento político (Pastrana et al., 2018; Wren, 2014).

A pesar de la naturaleza global de la colaboración científica, las investigaciones previas sugieren que no todas las redes presentan el mismo nivel de robustez frente a perturbaciones. Los estudios sobre redes scale-free (Albert et al., 2000; Caldarelli, 2007) destacan que, si bien estas estructuras son resistentes a fallos aleatorios, resultan particularmente vulnerables a ataques dirigidos. En el contexto de la colaboración científica, esto implica que la eliminación de nodos clave, como investigadores altamente conectados, instituciones líderes o países estratégicos, podría provocar una fragmentación rápida de la red.

El análisis de topología de redes y modelos de percolación (Callaway et al., 2000; Holme et al., 2002) ha demostrado que la eficiencia y modularidad de una red influyen significativamente en su vulnerabilidad a la fragmentación. Sin embargo, mientras que estudios previos han abordado la resiliencia de redes complejas en general (Al Musawi et al., 2023; Newman, 2003), los mecanismos específicos que determinan la resiliencia de las redes de colaboración científica internacional siguen siendo un área poco explorada. La mayoría de los modelos actuales se centran en escenarios generales de ataques o fallos en infraestructura, sin considerar los factores socioeconómicos, políticos e institucionales que afectan el funcionamiento de las redes científicas.

En este contexto, el presente estudio busca responder:

¿Cómo medir la resiliencia de la red de colaboración científica Cuba-EE.UU. ante restricciones políticas y perturbaciones externas?

Se hipotetiza que la red presenta una red de tipo scale-free, lo que la haría resiliente a fallos aleatorios pero vulnerable a ataques dirigidos contra sus hubs.

METODOLOGÍA

Para evaluar la resiliencia de esta red, se emplearán herramientas y métricas propias del análisis de redes complejas. En particular, se estudiarán indicadores como el umbral de percolación, que permitirá identificar el punto crítico en el que la red colapsa ante la eliminación de nodos clave; el componente gigante, que mide la conectividad global de la red y su vulnerabilidad ante restricciones externas; y el coeficiente de clustering, que permite evaluar la cohesión local dentro de la red y la formación de comunidades de colaboración. Adicionalmente, se analizarán indicadores como la distribución de grado, la eficiencia de la red, y la centralidad de intermediación, los cuales proporcionarán una visión detallada sobre la estructura de la red y su capacidad de adaptación a contextos adversos.

Este enfoque metodológico permitirá comprender no solo la evolución de la red científica binacional, sino también los factores clave que han permitido su sostenibilidad en un entorno altamente restrictivo (Machlis et al., 2012; Ronda-Pupo, 2024). Asimismo, el análisis de estos indicadores ofrecerá evidencia empírica sobre cómo la colaboración científica entre Cuba y EE.UU. se reconfigura en respuesta a cambios políticos y regulatorios, brindando herramientas para fortalecer y garantizar su estabilidad a largo plazo (Pérez-Avila et al., 2018; Scott et al., 2018).

Descripción de los Datos

El análisis se basa en un conjunto de 3,428 artículos de colaboración científica entre Cuba y Estados Unidos, obtenidos de las bases de datos Web of Science (WoS) y Scopus. Se incluyeron tanto artículos de investigación como artículos de revisión, con el objetivo de capturar la mayor diversidad posible de interacciones científicas entre ambos países. La estrategia de búsqueda en WoS: CU = Cuba and DT = (Artículo o artículo de revisión), se filtró por países/regiones y se seleccionaron los artículos en colaboración con Estados Unidos. La estrategia de búsqueda en Scopus: AFFILCOUNTRY (cuba), se filtró por tipos de documentos artículo y revisión, y luego se filtró por país/territorio y se seleccionaron los artículos en colaboración con Estados Unidos.

Se descargaron los datos en formato .bib y se empleó el programa Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017) para unificar, remover duplicados y generar la base de datos para generar la red de colaboración internacional.

Los datos abarcan múltiples disciplinas científicas y reflejan la evolución de la colaboración a lo largo del tiempo, permitiendo evaluar la estructura de la red, sus principales actores y su resiliencia frente a restricciones externas. La combinación de fuentes garantiza una cobertura representativa de la producción científica binacional, proporcionando un panorama amplio para el análisis de la estabilidad y vulnerabilidad de la red de colaboración.

Construcción y Análisis de la Red de Colaboración

La red de colaboración es de nivel país. Cada nodo representa un país y cada arista representa al menos un artículo en coautoría entre dos países. Para la creación de las redes de colaboración científica entre Cuba y Estados Unidos, se utilizó el software Bibliometrix (Aria & Cuccurullo, 2017), una herramienta especializada en el análisis bibliométrico de datos provenientes de bases de datos científicas como Web of Science (WoS) y Scopus. Este software permitió la extracción y procesamiento de los metadatos de los 3,428 artículos resultado de la búsqueda y curación de los datos, identificando relaciones entre países. A partir de estos datos, se generó una matriz de coautoría, en la que cada nodo representa a un país y cada enlace indica una colaboración entre ellos.

El análisis estructural y de resiliencia de la red se realizó mediante un programa en Python, utilizando bibliotecas especializadas como NetworkX, Pandas y Matplotlib. El procedimiento metodológico siguió cuatro etapas:

Etapa 1. Construcción de la Red. Se generó la red a partir de la matriz de coautoría procesada en Bibliometrix. Los nodos representan países y las aristas reflejan las colaboraciones científicas entre ellos.

Etapa 2. Cálculo de Métricas Estructurales. Se calcularon indicadores clave para caracterizar la red, incluyendo grado promedio, coeficiente de clustering, modularidad, eficiencia global y centralidad de hubs y autoridades.

Etapa 3. Evaluación de la Robustez y Resiliencia de la Red. Se realizaron simulaciones de fallos aleatorios y ataques dirigidos para evaluar la resistencia de la red a la eliminación progresiva de nodos. Se calcularon métricas como el umbral de percolación, la robustez estructural y el tamaño del componente gigante en distintos escenarios de fragmentación de la red.

Etapa 4. Comparación con Modelos Nulos. Para contextualizar los resultados, se comparó la red real con una red aleatoria basada en el modelo de Erdős & Rényi (1960), evaluando diferencias en conectividad y resistencia a perturbaciones. El modelo ER constituye el referente de máxima aleatoriedad estructural, en el cual los enlaces se generan de manera independiente con una probabilidad uniforme, eliminando así mecanismos endógenos como el apego preferencial, el cierre triádico o la formación de comunidades. En este sentido, proporciona una línea base conservadora de conectividad puramente estocástica, frente a la cual pueden evaluarse de forma significativa las propiedades emergentes de organización no aleatoria, tales como la heterogeneidad del grado, la robustez ante ataques dirigidos y la estabilidad de los componentes conexos. Modelos nulos más restrictivos —por ejemplo, aquellos que preservan la secuencia empírica de grados (modelo de configuración)— controlarían los efectos de primer orden asociados al grado, pero al mismo tiempo ocultarían precisamente la heterogeneidad estructural y las dinámicas de ventaja acumulativa que este estudio busca examinar. Al contrastar la red empírica con una línea base ER, se evalúa si los patrones observados de resiliencia exceden lo esperable bajo conectividad aleatoria, aislando así la contribución de la organización estructural emergente a la resiliencia sistémica.

Este procedimiento permitió cuantificar la estabilidad y vulnerabilidad de la red de colaboración científica Cuba-EE.UU., proporcionando información clave sobre su resiliencia y estrategias necesarias para fortalecerla ante restricciones externas.

Identificación de Hubs y Autoridades en la Red de Colaboración Científica

Para identificar los principales hubs y autoridades en la red de colaboración científica Cuba-EE.UU., se utilizó un enfoque basado en centralidad de hubs y autoridades, implementado mediante el algoritmo Hyperlink-Induced Topic Search (HITS) (Kleinberg, 1999). Este método permite diferenciar entre nodos que actúan como emisores de conocimiento (hubs) y aquellos que funcionan como receptores clave de información (autoridades) dentro de la red.

Aplicación del Algoritmo HITS

Se implementó el algoritmo HITS en Python, utilizando la biblioteca NetworkX, para calcular los puntajes de hubs y autoridades. La métrica de hub score identifica países con alta capacidad de distribuir información dentro de la red, es decir, aquellos que colaboran con múltiples otros países. La métrica de puntaje de autoridad (authority score) mide la capacidad de un nodo para recibir información, indicando países con alta conectividad entrante en la red. Se generaron los valores de centralidad de hubs y autoridades para cada país en la red. Se seleccionaron los cuatro principales hubs y autoridades en función de su puntaje.

Evaluación de Robustez ante Fallos y Ataques

Coefficiente de Asortatividad (r)

El coeficiente de asortatividad (Newman, 2002) mide si los nodos con alto grado (*hubs*) tienden a conectarse con otros hubs (asortatividad positiva) o con nodos de bajo grado (asortatividad negativa o desasortativa). En redes desasortativas, como muchas redes de colaboración científica, la eliminación de *hubs* puede acelerar la fragmentación. Se calcula como:

$$r = \frac{\frac{1}{M} \sum_i j_i k_i - \left[\frac{1}{M} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}{\frac{1}{M} \sum_i \frac{1}{2} (j_i^2 + k_i^2) - \left[\frac{1}{M} \sum_i \frac{1}{2} (j_i + k_i) \right]^2}$$

donde:

M es el número total de aristas,

j_i y k_i son los grados de los nodos en los extremos de la arista i .

Cambio en el Diámetro de la Red (D)

Este indicador mide cómo cambia la estructura de los caminos más cortos en la red cuando se eliminan nodos clave. Se define como:

$$D = \max d(i, j),$$

Donde $d(i, j)$ representa la distancia más corta entre los nodos i y j . A medida que la red se fragmenta, D tiende a aumentar significativamente, indicando una reducción en la eficiencia de flujo de información.

Eficiencia Global de la Red (E)

La eficiencia global de la red (Latora & Marchiori, 2001) cuantifica cuán fácilmente puede circular la información entre todos los pares de nodos, y se relaciona inversamente con las distancias geodésicas (y por tanto, de manera indirecta, con el diámetro): cuanto mayores son las distancias promedio (o más fragmentada la red), menor es la eficiencia. En análisis de resiliencia, permite evaluar la degradación funcional de la red tras la eliminación progresiva de nodos. Se calcula como:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d(i, j)}$$

Cuando la red colapsa, E disminuye drásticamente, reflejando una menor capacidad de comunicación eficiente.

Coeficiente de Clustering (C)

El coeficiente de clustering (Watts & Strogatz, 1998) cuantifica la tendencia de los nodos a formar grupos altamente conectados. Un valor alto indica que la red presenta redundancia en la conectividad, lo que puede aumentar la resiliencia manteniendo la conectividad local tras la eliminación de nodos clave. El coeficiente de clustering local de un nodo i se define como:

$$C_i = \frac{2e_i}{k_i(k_i - 1)},$$

Donde k_i es el grado del nodo i y e_i es el número de enlaces existentes entre sus vecinos.

Estrategia Metodológica para Evaluar la Resiliencia de la Red mediante Percolación

Para realizar un análisis sistemático de la robustez de la red, se seguirá la siguiente estrategia metodológica:

1. Simulación de Fallos Aleatorios: Se eliminarán nodos de manera aleatoria y se analizará la respuesta de $G(f)$.
2. Simulación de Ataques Dirigidos: Se eliminarán nodos en orden descendente de grado y se medirán los cambios en G , D , R , E , C e I .
3. Identificación del Umbral de Percolación (ϕ_c): Se determinará el punto crítico en el que la red sufre un colapso abrupto.
4. Comparación con Redes Aleatorias: Se comparará la resiliencia de la red con modelos de red aleatoria de Erdős-Rényi para evaluar si el comportamiento observado difiere del esperado en redes sin estructura jerárquica.

Se elige la comparación con el modelo de Erdős-Rényi ya permite evaluar si la estructura observada en la red real difiere significativamente de una red aleatoria, lo que proporciona evidencia sobre la existencia de patrones estructurales específicos en la colaboración científica Cuba-EE.UU.

Comparar la resiliencia de la red real con la de una red aleatoria permite determinar si la estructura de colaboración científica ofrece mayor estabilidad que un sistema aleatorio o, por el contrario, si es más vulnerable a perturbaciones. Dado que las redes *scale-free* son resistentes a fallos aleatorios pero frágiles ante ataques dirigidos, la comparación con una red Erdős-Rényi ayuda a contextualizar el nivel de vulnerabilidad de la red de colaboración Cuba-EE.UU.

Además, la comparación con un modelo Erdős-Rényi permite evaluar cómo la red de colaboración Cuba-EE.UU. responde a la eliminación de nodos en comparación con una red aleatoria. Si la red real colapsa más rápido en ataques dirigidos, esto confirmaría su dependencia de nodos clave (*hubs*) y su vulnerabilidad ante restricciones políticas.

Evaluación de Resiliencia de la Red

En el análisis de resiliencia de redes complejas, especialmente en las redes de colaboración científica internacional dentro de una disciplina específica, es fundamental emplear indicadores basados en percolación y robustez estructural (Callaway et al., 2000). Dado que estas redes suelen seguir una distribución de grado en ley de potencia (*scale-free networks*), presentan una alta resistencia a fallos aleatorios, pero son vulnerables a ataques dirigidos a nodos con alto grado (*hubs*) (Callaway et al., 2000; Holme et al., 2002).

A continuación, se presentan los principales indicadores utilizados en el análisis de percolación para evaluar la resiliencia de la red:

Tamaño del Componente Gigante (G)

Este indicador mide la fracción de nodos que permanecen en el componente más grande de la red después de la eliminación progresiva de nodos. Se calcula mediante la fórmula:

$$G = \frac{S}{N},$$

Donde S representa el tamaño del componente gigante y N es el número total de nodos en la red. Este indicador permite identificar el umbral crítico de percolación en el que la red se fragmenta.

Umbral de Percolación (ϕ_c)

El umbral de percolación (Cohen et al., 2000) es la fracción crítica de nodos eliminados en la que la red colapsa en múltiples componentes desconectados. En redes de tipo *scale-free* sin umbral definido ($\gamma \leq 3$), la red es altamente resistente a fallos aleatorios, pero colapsa ante ataques dirigidos a los nodos centrales. El umbral de percolación se determina en el punto donde G muestra una caída abrupta.

El umbral de percolación en redes complejas indica el punto crítico en el que la red comienza a fragmentarse debido a la eliminación de nodos. Para redes aleatorias de Erdős-Rényi (ER) y libres de escala (*scale-free*), el umbral de percolación se calcula de la siguiente manera:

Redes Aleatorias de Erdős-Rényi (ER)

Para una red aleatoria con un grado promedio $\langle k \rangle$, el umbral de percolación ϕ_c se define como:

$$\phi_c = \frac{1}{\langle k \rangle}$$

Donde:

ϕ_c es el umbral de percolación,

$\langle k \rangle$ es el grado promedio de la red, que se calcula como:

$$\langle k \rangle = \frac{2E}{N}$$

Donde E es el número total de enlaces en la red y N es el número total de nodos.

Redes Scale-Free con Exponente de Distribución γ

En redes libres de escala (*scale-free networks*), el umbral de percolación depende del exponente de la distribución de grado γ . Si la distribución de grado sigue una ley de potencia $P(k) \sim k^{-\gamma}$, el umbral de

percolación se define como:

$$\phi_c = 1 - \frac{1}{\frac{\langle k^2 \rangle}{\langle k \rangle} - 1}$$

donde:

$\langle k \rangle$ es el grado promedio de la red,

$\langle k^2 \rangle$ es el valor esperado del cuadrado del grado de los nodos.

Para redes libres de escala (*scale-free*) con $\gamma \leq 3$, $\langle k^2 \rangle$ tiende a infinito, lo que implica que no existe un umbral de percolación definido, y la red es altamente resiliente a fallos aleatorios, pero muy vulnerable a ataques dirigidos a los nodos con mayor grado.

Interpretación y Aplicación

El umbral de percolación representa la fracción crítica de nodos cuya eliminación provoca la desintegración del componente gigante de la red. Si es elevado, se requiere remover una proporción sustancial de nodos para inducir fragmentación sistémica, lo que indica mayor robustez estructural frente a perturbaciones. Por el contrario, un valor bajo de ϕ_c implica que la red pierde rápidamente su conectividad global tras la eliminación de un número reducido de nodos.

En redes científicas de colaboración, este indicador permite evaluar la vulnerabilidad estructural ante escenarios de restricción, reducción de financiamiento o salida de actores centrales. No obstante, dada la heterogeneidad típica de estas redes (distribuciones de grado sesgadas y presencia de hubs), la robustez frente a fallos aleatorios puede coexistir con alta fragilidad ante ataques dirigidos a nodos de alta centralidad, por lo que la interpretación del umbral debe contextualizarse según la estrategia de perturbación aplicada.

Robustez Estructural (R)

La robustez estructural (Schneider et al., 2011) evalúa la capacidad de la red para mantener la conectividad frente a ataques progresivos. Se define como el área bajo la curva del componente gigante $G(f)$ en función de la fracción de nodos eliminados f :

$$R = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^1 g(f) df$$

Una red altamente robusta tiene valores cercanos a 1, mientras que valores bajos indican una fragmentación rápida.

RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Resultados Descriptivos de la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU.

El análisis descriptivo de la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. revela que esta cuenta con 138 nodos (países) y 4 500 enlaces, lo que indica que la red está densamente conectada y permite múltiples interacciones entre los investigadores. La densidad de conexiones sugiere un alto nivel de colaboración científica, donde cada nodo (país) mantiene una conexión significativa con otros dentro de la red.

El grado promedio de la red es 65,22, lo que indica que, en promedio, cada país está conectado con aproximadamente 65 otros países. Este valor es bastante alto para una red científica, lo que significa que los investigadores mantienen una gran cantidad de colaboraciones y que la estructura de la red favorece la difusión de información y conocimientos. En redes altamente colaborativas, un grado promedio elevado es una señal de interconectividad y estabilidad. Este resultado está ocasionado porque el 30% de las colaboraciones son en las áreas *Physics Particles Field*, *Physics Nuclear* y *Astronomy Astrophysics* que son disciplinas con la participación de gran número de investigadores de varios países.

El promedio de intermediación es 0,0039, lo que sugiere que, en promedio, los nodos (países) no actúan como intermediarios críticos en la transmisión de información. En otras palabras, la estructura de la red no depende de unos pocos nodos para conectar diferentes partes del sistema, lo cual es positivo para la resiliencia, ya que la eliminación de un nodo específico no afectará significativamente la conectividad general. Un bajo valor de intermediación indica una distribución descentralizada del flujo de información en la red.

El promedio de cercanía es 0,6748, lo que indica que los nodos tienen un acceso rápido a cualquier otro nodo en la red. La cercanía mide la eficiencia con la que un nodo puede llegar a todos los demás nodos en la red, y un valor alto sugiere que la colaboración científica ocurre en un espacio altamente accesible, sin la presencia de barreras significativas que dificulten la comunicación.

En conjunto, estos resultados muestran una red de colaboración científica altamente conectada, eficiente y descentralizada, lo que la hace menos susceptible a interrupciones y favorece una colaboración sostenida a pesar de posibles restricciones externas.

Resultados sobre los Principales Hubs y Autoridades en la Red de Colaboración Científica

La Tabla 1 muestra los resultados con los principales hubs y autoridades en la red de colaboración científica Cuba-EE.UU. El resultado revela que Estados Unidos ocupa la posición central, tanto como emisor como receptor de información, con un puntaje de 0,0449 en ambas métricas. Esto indica que EE.UU. no solo genera una gran cantidad de colaboraciones científicas, sino que también es un receptor clave de conocimiento dentro de la red. Brasil (0,0304) y México (0,0298) también emergen como actores importantes, desempeñando un papel relevante en la intermediación del flujo de información científica. Esto sugiere que América Latina, particularmente Brasil y México, actúan como puentes clave en la colaboración internacional, facilitando la interacción entre científicos de diferentes regiones. Reino Unido (0,0293) también muestra una participación

significativa, lo que indica la existencia de vínculos fuertes entre la red de colaboración de Cuba y los investigadores europeos.

Un hallazgo relevante es la similitud en los puntajes de hubs y autoridades, lo que indica que los países que generan conocimiento también son altamente receptivos a la colaboración con otros actores dentro de la red. Esta característica sugiere que la colaboración científica en la red de Cuba-EE.UU. es altamente recíproca y descentralizada, sin una dependencia excesiva de un solo país para la generación o recepción de conocimiento. En conjunto, estos resultados reflejan una estructura de colaboración equilibrada y diversa, con múltiples centros de intercambio de información donde América Latina juega un papel fundamental junto con Estados Unidos y Europa.

En la Tabla 1. Principales Hubs y Autoridades en la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU. Valores de centralidad de hubs y autoridades en la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. calculados mediante el algoritmo HITS. Los hubs representan los países con mayor capacidad de distribuir conocimiento en la red, mientras que las autoridades son aquellos que reciben un alto volumen de conexiones. Estados Unidos lidera ambas métricas, seguido de Brasil, México y el Reino Unido, destacando su papel como facilitadores clave en la colaboración científica.

Tabla 1. Principales Hubs y Autoridades en la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU.

Hub	Puntaje de hub	Autoridad	Puntaje de autoridad
EE.UU.	0,449	EE.UU.	0,449
Brasil	0,304	Brasil	0,300
México	0,298	México	0,298
Reino Unido	0,293	Reino Unido	0,291

Resultados sobre la Robustez de la Red ante Fallos y Ataques

La Figura 1 muestra los resultados del análisis de la resiliencia de la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. El resultado sugiere que, a medida que se eliminan nodos, el tamaño de la componente gigante disminuye progresivamente hasta alcanzar un punto crítico en el que la red colapsa abruptamente. Al comparar la red real con un modelo nulo basado en una red aleatoria, se observa que ambas siguen un patrón similar en las primeras etapas de eliminación de nodos, con una disminución gradual de la conectividad. Sin embargo, a partir de aproximadamente el 60% de nodos eliminados, la red real comienza a fragmentarse mucho más rápido que el modelo nulo, lo que indica una mayor vulnerabilidad a la eliminación de nodos clave.

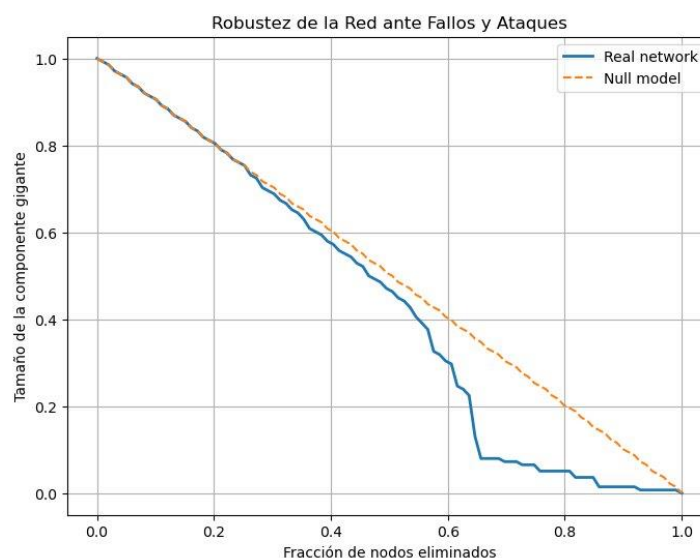
Este comportamiento sugiere que la red de colaboración sigue una estructura *scale-free*, donde un pequeño número de nodos altamente conectados (*hubs*) desempeñan un papel fundamental en la cohesión de la red. Una vez que estos nodos son eliminados, la red se fragmenta de manera abrupta, lo que confirma la existencia de un umbral de percolación en torno al 60-70% de eliminación de nodos, tras el cual la red pierde casi toda su conectividad. En contraste, el modelo nulo presenta una degradación más progresiva, lo que indica que una red completamente aleatoria sería más resistente a fallos dirigidos.

Estos resultados evidencian que, si bien la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. es altamente conectada en su estado original (densidad), su estabilidad depende en gran medida de un conjunto reducido de países clave. Para mejorar su resiliencia ante restricciones externas o cambios en la política internacional,

sería recomendable fortalecer las conexiones entre investigadores con menor grado de conectividad, reduciendo así la dependencia de los *hubs* y mitigando los efectos de posibles interrupciones en la colaboración.

En la Figura 1. Evaluación de la Robustez de la Red ante la Eliminación de Nodos. Comparación entre la red real de colaboración científica Cuba-EE.UU. (línea azul) y un modelo nulo basado en una red aleatoria (línea naranja discontinua). Se muestra cómo el tamaño de la componente gigante disminuye a medida que se eliminan nodos. Se observa que la red real es más vulnerable a la eliminación de nodos clave, con una caída abrupta de la conectividad a partir del 60% de nodos eliminados, lo que indica la existencia de un umbral de percolación.

Figura 1. Evaluación de la Robustez de la Red ante la Eliminación de Nodos. Comparación entre la red real de colaboración científica Cuba-EE.UU. (línea azul) y un modelo nulo basado en una red aleatoria (línea naranja discontinua)



Resultados del Análisis de la Resiliencia de la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU.

El análisis de la resiliencia de la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. revela que la estructura presenta una resistencia moderada a perturbaciones (Tabla 2), con un umbral de percolación de 0,4747, lo que indica que la red comienza a fragmentarse cuando se eliminan aproximadamente el 47,47% de los nodos. La robustez estructural medida es de 0,435, lo que sugiere que la red es vulnerable a ataques dirigidos contra nodos clave (*hubs*).

Tabla 2. Indicadores de Resiliencia de la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU. Resumen de los principales indicadores de resiliencia y estructura de la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. Se incluyen métricas como el umbral de percolación, la robustez estructural, la asortatividad, el diámetro de la red y la eficiencia global, entre otras. Estos valores permiten evaluar la estabilidad y vulnerabilidad de la red ante perturbaciones.

Tabla 2. Indicadores de Resiliencia de la Red de Colaboración Científica Cuba-EE.UU.

Indicadores	Valores
Umbral de percolación	0,4747
Robustez estructural	0,435
Coeficiente de asortatividad	-0,303
Diámetro de la red	2
Eficiencia global	0,738
Coeficiente de clusterabilidad	0,813
Modularidad	0,0092
Comunidades detectadas	4

La red presenta una estructura desasortativa, con un coeficiente de asortatividad de -0,303, lo que significa que los nodos altamente conectados tienden a enlazarse con nodos de menor grado en lugar de formar clústeres entre sí. Esta configuración es común en redes *scale-free* y, si bien facilita la distribución eficiente de información, hace que la red sea susceptible a la eliminación de *hubs*, lo que podría acelerar su fragmentación. A pesar de esto, la conectividad de la red es alta, con un diámetro de 2, lo que indica que cualquier nodo puede alcanzar a otro en solo dos pasos, garantizando una comunicación eficiente dentro de la red.

La eficiencia global de la red es de 0,738, lo que muestra que la transmisión de información es rápida incluso tras la eliminación de algunos nodos. Además, el coeficiente de clustering es alto (0,813), lo que indica que los investigadores tienden a trabajar en grupos interconectados, proporcionando redundancia estructural que favorece la resiliencia local. Sin embargo, la modularidad de la red es muy baja (0,0092), lo que sugiere que no hay una separación clara entre comunidades y que la colaboración ocurre dentro de una estructura integrada. A pesar de esto, el análisis de comunidades detectó cuatro grupos principales, lo que implica la existencia de ciertos subgrupos de colaboración, posiblemente definidos por áreas de especialización o instituciones científicas.

En conjunto, estos resultados indican que la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. es altamente conectada y eficiente, con una estructura que favorece la difusión del conocimiento. No obstante, la fuerte dependencia de *hubs* representa una vulnerabilidad ante restricciones externas o cambios en la política internacional. Para mejorar la resiliencia de la red, sería recomendable fortalecer la interconexión entre comunidades y diversificar las conexiones para reducir el impacto de la eliminación de nodos clave.

DISCUSIÓN

El análisis de la red de colaboración científica entre Cuba y EE.UU. revela una arquitectura estructuralmente densa y funcionalmente eficiente, pero estratégicamente frágil. El elevado grado promedio (65,22) y la alta eficiencia global (0,738) indican que, a pesar del contexto de restricciones políticas, la red ha logrado consolidar múltiples canales de intercambio científico. Sin embargo, esta densidad no implica simetría estructural. El coeficiente de asortatividad negativo (-0,303) muestra que la red está organizada de forma desasortativa: los nodos altamente conectados se vinculan preferentemente con nodos de menor grado. Este patrón no es accidental. En contextos de sanciones o tensiones diplomáticas, la cooperación tiende a concentrarse en actores con mayor capacidad institucional, acceso a financiamiento internacional y legitimidad académica. La estructura observada sugiere, por tanto, una dinámica de intermediación jerárquica más que una colaboración horizontal.

La centralidad simultánea de EE.UU. como principal hub y autoridad confirma su papel como núcleo estructural del sistema. No obstante, el hallazgo más relevante no es la centralidad estadounidense —

previsible dada la asimetría científica global— sino el rol de Brasil y México como plataformas intermedias. Estos países actúan como nodos de amortiguación geopolítica, reduciendo el costo político de la interacción directa y generando rutas indirectas de colaboración. En términos de teoría de redes, operan como brokers regionales que disminuyen la dependencia de un único canal bilateral. Este patrón sugiere que la resiliencia del sistema no descansa únicamente en la relación Cuba–EE.UU., sino en una arquitectura triádica más amplia donde América Latina cumple una función estabilizadora.

Desde la perspectiva de resiliencia, los valores de robustez estructural (0,435) y el umbral de percolación (0,4747) indican una resistencia moderada frente a perturbaciones aleatorias, pero una vulnerabilidad pronunciada ante ataques dirigidos. Este resultado es coherente con la teoría de redes libres de escala: la presencia de hubs incrementa la eficiencia sistémica, pero también concentra el riesgo. Lo relevante aquí es que la red colapsa más rápidamente que el modelo nulo de Erdős–Rényi bajo eliminación dirigida, lo que confirma que su estructura no es aleatoria, sino jerárquica y dependiente de nodos estratégicos. En contextos de sanciones, esta dependencia puede traducirse en vulnerabilidad institucional si los actores centrales enfrentan restricciones regulatorias, financieras o migratorias.

La baja modularidad (0,0092) introduce una dimensión adicional. Aunque existen comunidades identificables, estas no están fuertemente segregadas. Esta integración facilita el flujo de información y evita compartimentos estancos, pero también implica que las perturbaciones se propagan rápidamente a través del sistema. En contraste, redes bilaterales bajo sanciones más severas —como ciertos análisis reportados para colaboraciones Irán–EE.UU. o Rusia–UE tras episodios de ruptura diplomática— tienden a mostrar mayor modularización y fragmentación temática, reflejando estrategias de aislamiento o reorientación regional. En comparación, la red Cuba–EE.UU. exhibe una integración más profunda, lo que sugiere que la diplomacia científica ha operado como un mecanismo de continuidad estructural incluso en escenarios políticos adversos.

Un hallazgo clave es que la fragmentación abrupta ocurre alrededor del 60% de eliminación de nodos bajo ataque dirigido. Este punto crítico indica que la red posee redundancia local ($\text{clustering} = 0,813$), pero no suficiente diversidad estructural para sostener la conectividad global tras la pérdida de actores centrales. En términos geopolíticos, esto implica que la colaboración científica bilateral depende desproporcionadamente de un conjunto reducido de instituciones y países intermediarios. Si estos canales se ven interrumpidos, la red no se degrada gradualmente, sino que experimenta una transición abrupta hacia la fragmentación.

En conjunto, los resultados sugieren que la red Cuba–EE.UU. combina tres características estructurales: alta eficiencia funcional, intermediación regional latinoamericana y dependencia jerárquica de hubs centrales. Esta combinación produce una resiliencia aparente bajo perturbaciones difusas, pero una fragilidad estratégica ante restricciones focalizadas. Más que un simple “puente científico”, la red funciona como un sistema adaptativo que equilibra cooperación directa e indirecta para mitigar tensiones políticas, aunque sin lograr una descentralización suficiente que garantice estabilidad estructural de largo plazo.

CONCLUSIONES

Este estudio muestra que la resiliencia de la colaboración científica entre Cuba y EE.UU. no depende únicamente de su densidad o volumen de interacción, sino de su configuración estructural. La red combina alta eficiencia funcional con una marcada concentración jerárquica del riesgo. Esta dualidad —eficiencia y vulnerabilidad simultáneas— revela que la diplomacia científica bilateral opera como un sistema adaptativo: mantiene la conectividad global incluso en contextos políticamente adversos, pero lo hace apoyándose en un conjunto reducido de nodos estratégicos y en intermediaciones regionales que amortiguan la tensión geopolítica directa.

Más allá del caso específico, el aporte central del estudio es mostrar que la resiliencia en redes científicas bajo restricciones políticas debe evaluarse mediante indicadores estructurales dinámicos (percolación, robustez integrada, modularidad), y no únicamente a partir del volumen de producción o la existencia de colaboración. La red Cuba–EE.UU. no es frágil en términos absolutos, pero su estabilidad depende de la continuidad operativa de actores clave y de corredores regionales específicos, lo que implica una resiliencia condicionada más que estructuralmente distribuida.

Limitaciones del estudio

Este trabajo presenta varias limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, el análisis se basa exclusivamente en datos bibliográficos provenientes de bases como Web of Science y Scopus, lo que excluye otras formas de producción científica (libros, capítulos, conferencias, repositorios institucionales o Google Scholar), potencialmente relevantes en contextos de restricciones formales. En segundo lugar, la red fue modelada a nivel país, lo que impide capturar dinámicas institucionales o individuales que podrían modificar la estructura observada. En tercer lugar, el análisis se realizó como una red agregada, sin una exploración diacrónica detallada que permita identificar cambios estructurales asociados a eventos políticos específicos. Finalmente, el modelo nulo utilizado (Erdős–Rényi) proporciona una línea base de aleatoriedad estructural, pero no controla por la distribución empírica del grado, lo que podría explorarse en estudios futuros mediante modelos de configuración.

Líneas futuras de investigación

A partir de estas limitaciones, futuras investigaciones podrían avanzar en al menos tres direcciones. Primero, desarrollar análisis temporales que permitan examinar cómo la resiliencia evoluciona en respuesta a cambios regulatorios o diplomáticos concretos. Segundo, modelar la red a niveles múltiples—institucional e individual—para evaluar si la vulnerabilidad observada se concentra en ciertas universidades o investigadores clave. Tercero, realizar comparaciones sistemáticas con otras redes bilaterales sometidas a sanciones o tensiones geopolíticas (por ejemplo, Irán–EE.UU. o Rusia–UE), con el fin de determinar si el patrón de resiliencia jerárquica identificado constituye una característica general de la diplomacia científica bajo restricciones o una especificidad del caso Cuba–EE.UU.

En síntesis, la resiliencia de la red analizada no es el resultado de una estructura homogénea y distribuida, sino de un equilibrio delicado entre centralización y redundancia. Comprender este equilibrio es esencial para diseñar políticas científicas que fortalezcan la cooperación internacional en contextos de incertidumbre geopolítica creciente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Musawi, A. F., Roy, S., & Ghosh, P. (2023). Examining indicators of complex network vulnerability across diverse attack scenarios. *Sci Rep*, 13(1), 18208. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45218-9>
- Albert, R., Jeong, H., & Barabasi, A. L. (2000). Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794), 378-382. <https://doi.org/10.1038/35019019>
- Anthes, R., Robock, A., Antuña-Marrero, J. C., García, O., Braun, J. J., & Arredondo, R. E. (2015). Cooperation on GPS Meteorology between the United States and Cuba. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(7), 1079-1088. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00171.1>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

- Caldarelli, G. (2007). *Scale-free networks: complex webs in nature and technology*. Oxford University Press.
- Callaway, D. S., Newman, M. E., Strogatz, S. H., & Watts, D. J. (2000). Network robustness and fragility: percolation on random graphs. *Phys Rev Lett*, 85(25), 5468-5471. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.5468>
- Cao, R. (2015). Cuba-USA collaboration can go nano [Meeting Abstract]. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 250, 1.
- Chapman, H. J., Armas-Pérez, L. A., Lauzardo, M., & González-Ochoa, E. R. (2018). Moving Closer to Tuberculosis Elimination through Institutional Scientific Collaboration: Opportunities for Cuba and the USA. *Medicc Review*, 20(2), 59-63.
- Cohen, R., Erez, K., ben-Avraham, D., & Havlin, S. (2000). Resilience of the internet to random breakdowns. *Phys Rev Lett*, 85(21), 4626-4628. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4626>
- Demain, A. L. (2009). Scientific links with Cuba flourished despite US embargo. *Nature*, 457(7233), 1079. <https://doi.org/10.1038/4571079c>
- DeWeerd, S. (2001). Embargoing science: US policy toward Cuba and scientific collaboration. *Bioscience*, 51(8), 612-612. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0612:Esuptc\]2.0.Co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0612:Esuptc]2.0.Co;2)
- Echegoyen, L. (2002). US-Cuba collaborations in chemical research: Fact or fantasy? *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 223, U168-U168. <Go to ISI>://WOS:000176296700778
- Fink, G. R., Leshner, A. I., & Turekian, V. C. (2014). Science diplomacy with Cuba. *Science*, 344(6188), 1065. <https://doi.org/10.1126/science.1256312>
- Heger, M. (2016). Delegation paves way for US-Cuba research collaborations. *Nature Medicine*, 22(6), 569-569. <https://doi.org/10.1038/nm0616-569>
- Holme, P., Kim, B. J., Yoon, C. N., & Han, S. K. (2002). Attack vulnerability of complex networks. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 65(5 Pt 2), 056109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.056109>
- Keck, C. W. (2016). The United States and Cuba - Turning Enemies into Partners for Health. *N Engl J Med*, 375(16), 1507-1509. <https://doi.org/10.1056/NEJMp1608859>
- Kleinberg, J. M. (1999). Authoritative sources in a hyperlinked environment. *Journal of the ACM*, 46(5), 604-632. <https://doi.org/10.1145/324133.324140>
- Latora, V., & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Phys Rev Lett*, 87(19), 198701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>
- Lempinen, E. W. (2009). *U.S. Science Delegation Completes Hopeful Three-Day Visit to Cuba*. AAAs.org. Retrieved April 15 2021 from <https://www.aaas.org/news/us-science-delegation-completes-hopeful-three-day-visit-cuba>
- Machlis, G., Frankovich, T. A., Alcolado, P. M., Garcia-Machado, E., Hernandez-Zanuy, A. C., Hueter, R. E., Knowlton, N., Perera, E., & Tunnell, J. W. (2012). Ocean Policy US-Cuba Scientific Collaboration Emerging Issues and Opportunities in Marine and Related Environmental Sciences. *Oceanography*, 25(2), 227-231. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2012.63>
- Newman, M. E. (2002). Assortative mixing in networks. *Phys Rev Lett*, 89(20), 208701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.208701>

- Newman, M. E. J. (2003). The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Review*, 45(2), 167-256. <https://doi.org/10.1137/s003614450342480>
- O'Connell, J., Gálvez-González, A. M., Scandlyn, J., Sala-Adam, M. R., & Martín-Linares, X. (2018). A Collaboration to Teach US MPH Students about Cuba's Health Care System. *Medicc Review*, 20(2), 49-53.
- Pastrana, S. J. (2015). Science in U.S.-Cuba relations. *Science*, 348(6236), 735. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9542>
- Pastrana, S. J., & Clegg, M. T. (2008). U.S.-Cuban scientific relations. *Science*, 322(5900), 345. <https://doi.org/10.1126/science.1162561>
- Pastrana, S. J., Gual-Soler, M., & Wang, T. C. (2018). Promoting Scientific Cooperation in Times of Diplomatic Challenges: Sustained Partnership between the Cuban Academy of Sciences and the American Association for the Advancement of Science. *MEDICC*, 20(2), 23-26.
- Pérez-Avila, J., Guzmán-Tirado, M. G., Fraga-Nodarse, J., Handley, F. G., Meegan, J., de la Cotera, J., & Fauci, A. S. (2018). US and Cuban Scientists Forge Collaboration on Arbovirus Research. *Medicc Review*, 20(2), 32-34.
- Ronda-Pupo, G. A. (2021). Cuba—U.S. scientific collaboration: Beyond the embargo. *Plos One*, 16(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255106>
- Ronda-Pupo, G. A. (2023). Mexico: a bridge in Cuba-US scientific collaboration. *Scientometrics*, 128(4), 2301-2315. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04668-8>
- Ronda-Pupo, G. A. (2024). The dynamics of Cuban international scientific collaboration: a scientometric analysis over a century. *Scientometrics*, 129(9), 5211-5226. <https://doi.org/10.1007/s11192-024-05137-6>
- Schneider, C. M., Moreira, A. A., Andrade, J. S., Jr., Havlin, S., & Herrmann, H. J. (2011). Mitigation of malicious attacks on networks. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 108(10), 3838-3841. <https://doi.org/10.1073/pnas.1009440108>
- Scott, W., Fuller, A., Dounay, A., Samaritoni, J., Odonnell, M., Dave, P., Sanchez, J., Tiano, D., & Rivera, D. G. (2018). Ernest Eliel Workshop: US and Cuba collaboration in chemistry education and neglected disease drug discovery. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 255.
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- Wren, K. (2014). *Science Diplomacy, Visit to Cuba Produces Historic Agreement*. AAAS News. Retrieved April 15 2021 from <https://www.aaas.org/news/science-diplomacy-visit-cuba-produces-historic-agreement>