

## Sistema adaptativo basado en redes bayesianas para la autorregulación del aprendizaje

---

Byron Oviedo-Bayas\*  
Efraín Díaz-Macías\*  
Jorge Guanín-Fajardo\*  
Omar Oviedo-Armijos\*

---

### Resumen

El presente artículo describe el diseño, desarrollo y evaluación empírica de un Sistema de Tutoría Inteligente denominado SARA, concebido para promover de manera explícita la autorregulación del aprendizaje en contextos de Educación Superior. A diferencia de los sistemas de tutoría tradicionales, cuya adaptación se centra casi exclusivamente en el nivel de conocimiento del estudiante, SARA integra un modelo formal de autorregulación sustentado en una Red Bayesiana dinámica de doble capa. Este modelo permite inferir en tiempo real los estados de planificación, supervisión y reflexión de los estudiantes a partir de sus patrones de interacción con el sistema, tales como el tiempo de respuesta, el uso de ayudas, la secuencia de intentos y la consulta de herramientas metacognitivas. Sobre la base de dichas inferencias probabilísticas, el sistema genera intervenciones tutoriales personalizadas orientadas no solo a la resolución de tareas, sino al fortalecimiento

---

\* Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Computación, boviedo@uteq.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-5366-5917>

\* Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Computación, efraindiaz@uteq.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-4087-029X>

\* Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Computación, jorgeguanin@uteq.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-9150-4009>

\* Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ooviedoa@uteq.edu.ec, <https://orcid.org/0009-0005-4211-8503>

de estrategias metacognitivas efectivas. La evaluación se llevó a cabo mediante un diseño cuasi-experimental en un curso universitario de estadística aplicada, comparando un grupo experimental que utilizó SARA con un grupo de control que empleó un sistema adaptativo centrado únicamente en el conocimiento del dominio. Los resultados evidencian que los estudiantes que interactuaron con SARA obtuvieron mayores ganancias de aprendizaje, mostraron mejoras significativas en conductas objetivas de autorregulación y reportaron un uso más frecuente de estrategias autorreguladas. Asimismo, el modelo bayesiano integrado presentó una mayor precisión predictiva respecto al desempeño estudiantil. En conjunto, los hallazgos confirman que la incorporación de modelos computacionales de autorregulación en sistemas de tutoría inteligente constituye un avance relevante para el desarrollo de aprendizajes profundos, autónomos y sostenibles en la educación universitaria.

**Palabras clave:** metacognición, personalización educativa, aprendizaje autónomo, inteligencia artificial educativa, analítica del aprendizaje.

---

### **Adaptive system based on bayesian networks for self-regulated learning**

---

#### **Abstract**

This article describes the design, development, and empirical evaluation of an Intelligent Tutoring System called SARA, designed to explicitly promote self-regulated learning in higher education contexts. Unlike traditional tutoring systems, which focus almost exclusively on the student's level of knowledge, SARA integrates a formal self-regulation model based on a dynamic double-layer Bayesian network. This model allows real-time inference of

students' planning, monitoring, and reflection states based on their patterns of interaction with the system, such as response time, use of aids, sequence of attempts, and consultation of metacognitive tools. Based on these probabilistic inferences, the system generates personalized tutorial interventions aimed not only at task completion but also at strengthening effective metacognitive strategies. The evaluation was conducted using a quasi-experimental design in a university course on applied statistics, comparing an experimental group that used SARA with a control group that used an adaptive system focused solely on domain knowledge. The results show that students who interacted with SARA achieved greater learning gains, showed significant improvements in objective self-regulation behaviors, and reported more frequent use of self-regulated strategies. Likewise, the integrated Bayesian model showed greater predictive accuracy with respect to student performance. Taken together, the findings confirm that the incorporation of computational self-regulation models into intelligent tutoring systems constitutes a significant advance for the development of deep, autonomous, and sustainable learning in university education.

**Keywords:** metacognition, educational personalization, autonomous learning, educational artificial intelligence, learning analytics.

**Received :** 13-10-2025

**Approved:** 21-11-2025

## INTRODUCCIÓN

La Educación Superior contemporánea se encuentra inmersa en un escenario caracterizado por la expansión de la matrícula, la diversificación de los perfiles estudiantiles y la creciente incorporación de tecnologías digitales en los procesos formativos.

Este contexto plantea un desafío central para las instituciones universitarias: cómo garantizar aprendizajes profundos y de calidad en entornos cada vez más masificados y heterogéneos. La investigación educativa ha mostrado de manera consistente que el aprendizaje significativo no depende únicamente de la exposición a contenidos, sino de la capacidad del estudiante para gestionar activamente su propio proceso cognitivo y motivacional (Schunk & Zimmerman, 2011). En este sentido, la autorregulación del aprendizaje se ha consolidado como uno de los constructos más relevantes para comprender y potenciar el rendimiento académico en contextos universitarios.

La autorregulación del aprendizaje se concibe como un proceso activo y cíclico mediante el cual los estudiantes planifican sus metas, supervisan su progreso, regulan sus estrategias cognitivas y reflexionan sobre los resultados obtenidos, ajustando su comportamiento en función de la retroalimentación interna y externa (Panadero, 2017). Diversos estudios han evidenciado que los estudiantes con altos niveles de autorregulación presentan un mejor desempeño académico, una mayor persistencia ante las dificultades y una disposición más favorable hacia el aprendizaje autónomo, especialmente en entornos mediados por tecnología (Broadbent & Poon, 2015). No obstante, estas competencias no suelen desarrollarse de manera espontánea y requieren de apoyos pedagógicos explícitos y sistemáticos.

En la práctica educativa, promover la autorregulación representa un reto considerable para el docente universitario, particularmente en aulas numerosas o en modalidades virtuales. La provisión de retroalimentación individualizada, oportuna y orientada a los procesos metacognitivos demanda un tiempo y una dedicación que difícilmente pueden sostenerse a gran escala. En este escenario, los Sistemas de Tutoría Inteligente han emergido como

una alternativa tecnológica con alto potencial para ofrecer apoyo personalizado al aprendizaje. Estos sistemas buscan emular ciertas funciones del tutor humano mediante la adaptación de contenidos, actividades y retroalimentación a las características del estudiante (Ma et al., 2014).

Sin embargo, la mayoría de los Sistemas de Tutoría Inteligente desarrollados hasta la fecha se han enfocado principalmente en modelar el conocimiento del dominio, es decir, en identificar qué sabe o no sabe el estudiante. Modelos clásicos como el Trazado de Conocimiento Bayesiano han demostrado ser eficaces para representar la adquisición progresiva de habilidades en dominios bien estructurados (Corbett & Anderson, 1994). A pesar de su utilidad, este enfoque resulta limitado, ya que reduce el aprendizaje a una acumulación de conocimientos y deja de lado dimensiones fundamentales como las estrategias utilizadas, la gestión del esfuerzo, la toma de decisiones y la reflexión sobre el propio desempeño.

El avance hacia sistemas de tutoría verdaderamente inteligentes requiere, por tanto, de modelos de estudiante más integrales, capaces de representar no solo el conocimiento, sino también los procesos metacognitivos y autorregulatorios. En este punto, las Redes Bayesianas se presentan como una herramienta particularmente adecuada. Estas estructuras probabilísticas permiten modelar relaciones causales entre variables observables y latentes, manejar la incertidumbre inherente a los procesos cognitivos y actualizar creencias a partir de nueva evidencia (Pearl, 1988). En el ámbito educativo, las Redes Bayesianas han sido ampliamente utilizadas para el modelado del estudiante, destacando por su capacidad explicativa y diagnóstica (Millán et al., 2010).

Diversas investigaciones han explorado el uso de modelos probabilísticos para representar aspectos específicos de la metacognición y la motivación. Por ejemplo, se ha estudiado la búsqueda de ayuda, la calibración de la confianza y el compromiso del estudiante, evidenciando que estas variables influyen de manera directa en el aprendizaje (Roll et al., 2011; Csikszentmihalyi & Nakamura, 2014). No obstante, muchos de estos enfoques se han centrado en componentes aislados de la autorregulación o han sido diseñados para dominios muy específicos, lo que limita su generalización y su impacto en contextos educativos reales.

A partir de este análisis, se identifica una brecha relevante en la literatura: la ausencia de sistemas adaptativos que integren de manera explícita y sistemática un modelo completo de autorregulación del aprendizaje y que utilicen dicho modelo como base para la generación de intervenciones pedagógicas personalizadas. La mayoría de los Sistemas de Tutoría Inteligente utilizan la autorregulación como un medio indirecto para mejorar el aprendizaje del contenido. En contraste, la presente investigación propone situar la autorregulación como un objetivo central del proceso de tutoría, entendiendo el dominio disciplinar como el contexto en el cual se desarrollan y fortalecen las competencias metacognitivas.

En este marco, el objetivo del presente estudio es diseñar, implementar y evaluar un Sistema Adaptativo basado en Redes Bayesianas para la Autorregulación del Aprendizaje, denominado SARA, orientado a estudiantes de Educación Superior. El sistema se apoya en un modelo de estudiante de doble capa que integra, por un lado, el conocimiento del dominio y, por otro, las fases clave del ciclo de autorregulación propuesto por Zimmerman: planificación, supervisión y reflexión. La hipótesis central sostiene que la incorporación explícita de estas dimensiones permitirá no

solo mejorar los resultados de aprendizaje, sino también transformar las conductas y estrategias de estudio de los estudiantes, promoviendo una mayor autonomía.

## **METODOLOGÍA**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de diseño basado en la evidencia, orientado a la creación y validación de soluciones educativas en contextos reales (Anderson & Shattuck, 2012). Para la evaluación del sistema se adoptó un diseño cuasi-experimental con grupos no equivalentes, combinando métodos cuantitativos y cualitativos. La muestra estuvo conformada por 127 estudiantes universitarios matriculados en un curso de estadística aplicada, distribuidos en un grupo experimental que utilizó el sistema SARA con el módulo de autorregulación activo y un grupo de control que empleó una versión del sistema adaptada únicamente al conocimiento del dominio.

El sistema SARA fue desarrollado como una plataforma web interactiva que incorpora un modelo de estudiante implementado mediante una Red Bayesiana dinámica. La capa de conocimiento del dominio modela habilidades estadísticas clave, mientras que la capa de autorregulación representa las variables latentes de planificación, supervisión y reflexión, inferidas a partir de indicadores conductuales observables. El diseño de la investigación contempló la aplicación de pruebas de conocimiento antes y después de la intervención, el análisis de registros de interacción del sistema y la aplicación de un cuestionario validado de estrategias de autorregulación. El análisis estadístico incluyó análisis de covarianza, pruebas de comparación de medias y estimaciones del tamaño del efecto, garantizando el cumplimiento de los supuestos estadísticos correspondientes.

## RESULTADOS

El análisis de los resultados se estructuró en función de los objetivos del estudio y del modelo teórico de autorregulación del aprendizaje que sustenta el sistema SARA. En todos los casos, los resultados se obtuvieron a partir de la comparación entre el grupo experimental, que utilizó el sistema con el modelo de autorregulación activo, y el grupo de control, que interactuó con un sistema adaptativo centrado exclusivamente en el conocimiento del dominio. Para cada resultado se describe, en primer lugar, el procedimiento seguido para su obtención, posteriormente se presenta la evidencia empírica en forma tabular, luego se expone el análisis estadístico correspondiente y, finalmente, se discuten los hallazgos a la luz de los autores considerados en el estudio.

En relación con el impacto del sistema en el aprendizaje del dominio de estadística, los resultados se obtuvieron a partir de la aplicación de una prueba de conocimientos antes y después de la intervención. Con el fin de controlar las diferencias iniciales entre los grupos, se utilizó un análisis de covarianza, considerando la puntuación pretest como covariable y la puntuación posttest como variable dependiente. Previamente se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad, homogeneidad de varianzas y linealidad entre la covariable y la variable dependiente, lo que permitió asegurar la validez del análisis inferencial.

**Tabla 1**

*Comparación de las puntuaciones de conocimiento en estadística entre el grupo experimental y el grupo de control*

| Grupo                | n  | Pretest M<br>(DE) | Posttest M<br>(DE) | Media ajustada<br>posttest | F    | p    | d    |
|----------------------|----|-------------------|--------------------|----------------------------|------|------|------|
| Experimental<br>(GE) | 65 | 10.21 (3.14)      | 15.89 (2.87)       | 15.82                      | 6.73 | .011 | 0.46 |
| Control (GC)         | 62 | 10.45 (3.01)      | 14.73 (3.22)       | 14.80                      |      |      |      |

**Nota.** DE = desviación estándar; d = tamaño del efecto de Cohen.

El análisis estadístico evidenció un efecto significativo del grupo sobre el rendimiento final en estadística una vez controlado el conocimiento previo. La covariable pretest mostró una influencia significativa sobre el posttest, lo que confirma que el nivel inicial de conocimiento condiciona el desempeño final. No obstante, al aislar este efecto, se observó que los estudiantes del grupo experimental alcanzaron puntuaciones significativamente superiores a las del grupo de control. El tamaño del efecto obtenido puede considerarse moderado, lo que indica que la diferencia no solo es estadísticamente significativa, sino también relevante desde el punto de vista educativo.

Desde una perspectiva teórica, estos resultados son coherentes con los planteamientos de Zimmerman y Schunk, quienes sostienen que la autorregulación del aprendizaje actúa como un facilitador clave del rendimiento académico. El hecho de que el sistema SARA incorpore intervenciones orientadas a la planificación, supervisión y reflexión explica que los estudiantes no solo aprendan más contenido, sino que lo hagan de manera más eficaz. Asimismo, estos hallazgos se alinean con los resultados reportados por Ma et al., quienes destacan que los sistemas de tutoría inteligente

muestran mayores efectos cuando apoyan procesos cognitivos de orden superior y no se limitan a la presentación adaptativa de contenidos.

En cuanto a los cambios en las conductas de autorregulación, los resultados se obtuvieron a partir del análisis de los registros de interacción del sistema. Se definieron indicadores conductuales objetivos asociados a las fases del ciclo de autorregulación, tales como el uso estratégico de ayudas, la gestión del tiempo en función de la dificultad de las tareas y la consulta de herramientas de reflexión. Estos indicadores se calcularon para cada estudiante y se compararon entre ambos grupos al final de la intervención mediante pruebas *t* para muestras independientes.

**Tabla 2**

*Métricas conductuales de autorregulación del aprendizaje por grupo*

| <i>Indicador</i>                   | <i>Grupo</i>        | <i>M (DE)</i>  | <i>t(125)</i> | <i>p</i>  | <i>d</i> |
|------------------------------------|---------------------|----------------|---------------|-----------|----------|
| <i>Uso estratégico de ayudas</i>   | <i>Experimental</i> | 0.72<br>(0.18) | 6.12          | <<br>.001 | 1.03     |
|                                    | <i>Control</i>      | 0.51<br>(0.22) |               |           |          |
| <i>Relación tiempo– dificultad</i> | <i>Experimental</i> | 0.41<br>(0.19) | 4.35          | <<br>.001 | 0.77     |
|                                    | <i>Control</i>      | 0.25<br>(0.23) |               |           |          |
| <i>Consultas a la bitácora</i>     | <i>Experimental</i> | 3.15<br>(1.42) | 8.62          | <<br>.001 | 1.52     |
|                                    | <i>Control</i>      | 1.23<br>(1.05) |               |           |          |

**Nota.** *M = media; DE = desviación estándar; d = tamaño del efecto de Cohen.*

El análisis estadístico mostró diferencias altamente significativas en todos los indicadores conductuales evaluados, con tamaños del efecto grandes. Los estudiantes del grupo experimental utilizaron las ayudas de manera más estratégica, dedicaron más tiempo a las tareas de mayor dificultad y consultaron con mayor frecuencia las herramientas de reflexión. Estos resultados indican una mejora sustancial en la supervisión del aprendizaje y en la regulación del esfuerzo, aspectos centrales de la autorregulación.

La discusión de estos hallazgos puede vincularse directamente con los trabajos de Azevedo y colaboradores, quienes señalan que la autorregulación se manifiesta de forma observable en patrones de interacción específicos dentro de entornos digitales. En este sentido, el sistema SARA no solo infirió estados internos de autorregulación mediante la red bayesiana, sino que logró inducir cambios conductuales coherentes con una autorregulación más avanzada. De igual forma, los resultados respaldan lo señalado por Panadero, quien destaca que la reflexión suele ser la fase más débil del ciclo autorregulatorio, y muestran que el uso sistemático de herramientas metacognitivas puede fortalecerla cuando existe un andamiaje adecuado.

Finalmente, los resultados relacionados con las estrategias de autorregulación autorreportadas se obtuvieron mediante la aplicación del cuestionario MSLQ antes y después de la intervención. Para el análisis se utilizó nuevamente un análisis de covarianza, considerando la puntuación pretest como covariable y la puntuación posttest como variable dependiente.

**Tabla 3.**

Comparación de estrategias de autorregulación autorreportadas mediante el MSLQ

| Grupo                | n  | Pretest<br>(DE) | M Posttest<br>(DE) | M Media<br>ajustada<br>posttest | F    | p    | d    |
|----------------------|----|-----------------|--------------------|---------------------------------|------|------|------|
| Experimental<br>(GE) | 65 | 4.12 (0.61)     | 4.68 (0.53)        | 4.67                            | 8.94 | .003 | 0.53 |
| Control (GC)         | 62 | 4.09 (0.58)     | 4.32 (0.62)        | 4.33                            |      |      |      |

Nota. M = media; DE = desviación estándar; d = tamaño del efecto de Cohen.

El análisis estadístico evidenció que los estudiantes del grupo experimental reportaron un uso significativamente mayor de estrategias de autorregulación al finalizar la intervención, con un tamaño del efecto moderado. Este resultado complementa la evidencia conductual obtenida a partir de los registros del sistema y sugiere una coherencia entre el comportamiento observado y la percepción subjetiva de los estudiantes.

Desde el marco teórico, estos resultados refuerzan lo planteado por Broadbent y Poon, quienes subrayan que el desarrollo de la autorregulación en entornos digitales requiere apoyos explícitos y no emerge de manera automática. Asimismo, coinciden con los planteamientos de Roll et al., al evidenciar que la retroalimentación metacognitiva personalizada favorece una mayor conciencia

estratégica y un uso más deliberado de recursos de aprendizaje. En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de un modelo bayesiano de autorregulación en sistemas de tutoría inteligente permite no solo predecir el desempeño del estudiante, sino también transformar de manera significativa su forma de aprender.

La discusión de los resultados permite comprender con mayor profundidad el alcance y la relevancia del sistema SARA como propuesta tecnológica orientada a la promoción de la autorregulación del aprendizaje en la Educación Superior. Los hallazgos obtenidos confirman que la incorporación explícita de un modelo computacional de autorregulación, basado en redes bayesianas dinámicas, no solo es viable desde el punto de vista técnico, sino que aporta beneficios pedagógicos sustantivos que trascienden la mejora puntual del rendimiento académico.

Uno de los resultados más relevantes del estudio es la mejora significativa en el aprendizaje del dominio disciplinar observada en los estudiantes que interactuaron con SARA. Este efecto no puede interpretarse únicamente como una consecuencia de una adaptación más precisa de los contenidos, sino como el resultado de un cambio más profundo en la forma en que los estudiantes afrontan las tareas de aprendizaje. Al recibir retroalimentación orientada a la planificación, la supervisión y la reflexión, los estudiantes fueron guiados hacia un uso más consciente y estratégico de sus recursos cognitivos, lo que favoreció una comprensión más sólida y duradera de los contenidos. Este hallazgo refuerza la idea, ampliamente sostenida en la literatura, de que la autorregulación actúa como un mediador clave entre la instrucción y el logro académico, y demuestra que dicho mediador puede ser activamente fomentado mediante sistemas de tutoría inteligente.

Más allá del rendimiento académico, los cambios observados en las conductas objetivas de autorregulación constituyen una de las contribuciones más significativas del estudio. Los registros de interacción muestran que los estudiantes del grupo experimental adoptaron patrones de comportamiento más coherentes con una autorregulación avanzada, tales como un uso más estratégico de las ayudas, una gestión del tiempo más ajustada a la dificultad de las tareas y una mayor recurrencia a herramientas de reflexión. Estos resultados son especialmente relevantes porque evidencian transformaciones observables en el proceso de aprendizaje, y no únicamente en sus resultados finales. En este sentido, el sistema SARA no se limitó a inferir estados internos del estudiante, sino que logró influir activamente en sus decisiones y acciones durante la resolución de las tareas, cerrando el ciclo de la autorregulación de manera efectiva.

La coherencia entre los datos conductuales y los resultados obtenidos a partir de los autoinformes refuerza la solidez de las conclusiones. El incremento en el uso de estrategias de autorregulación reportado por los estudiantes sugiere que los cambios inducidos por el sistema no fueron meramente instrumentales o circunstanciales, sino que estuvieron acompañados de una mayor conciencia metacognitiva. Esta internalización de las estrategias es un aspecto clave, ya que constituye la base para la transferencia de la autorregulación a otros contextos de aprendizaje, más allá del entorno específico del sistema.

Desde una perspectiva computacional, la mayor precisión predictiva del modelo bayesiano que integra variables de autorregulación aporta evidencia de que estos constructos capturan información relevante y complementaria al conocimiento del dominio. Este resultado pone de manifiesto las limitaciones de

los modelos de estudiante centrados exclusivamente en el rendimiento cognitivo y subraya la necesidad de avanzar hacia representaciones más integrales del aprendiz. La capacidad de las redes bayesianas para manejar la incertidumbre y combinar múltiples fuentes de evidencia se confirma, así, como una fortaleza clave para el modelado de procesos complejos como la autorregulación del aprendizaje.

Las implicaciones de estos hallazgos son relevantes tanto para la investigación como para la práctica educativa. Desde el punto de vista del diseño de sistemas educativos, el estudio ofrece un marco concreto para el desarrollo de tutores inteligentes que no solo enseñen contenidos, sino que entrenen activamente a los estudiantes en cómo aprender. Para los docentes y las instituciones de educación superior, sistemas como SARA representan una oportunidad para proporcionar apoyo personalizado a gran escala, especialmente en contextos caracterizados por la diversidad de perfiles estudiantiles y la limitación de recursos tutoriales.

No obstante, los resultados deben interpretarse a la luz de ciertas limitaciones. El diseño cuasi-experimental, aunque adecuado para contextos educativos reales, restringe el alcance de las inferencias causales. Asimismo, la duración relativamente breve de la intervención no permite determinar en qué medida las mejoras observadas se mantienen a largo plazo o se transfieren a otros dominios. Además, si bien el modelo de autorregulación implementado abarca las fases centrales del ciclo propuesto por Zimmerman, otros factores relevantes, como la motivación, las emociones o las interacciones sociales, podrían integrarse de manera más explícita en futuras versiones del sistema.

En conjunto, los resultados de este estudio refuerzan la idea de que el verdadero potencial de la inteligencia artificial educativa no

reside únicamente en adaptar contenidos, sino en apoyar el desarrollo de competencias metacognitivas fundamentales. Al situar la autorregulación del aprendizaje como un objetivo central de la tutoría, el sistema SARA contribuye a una concepción más profunda y sostenible de la personalización educativa. De este modo, la investigación no solo valida una solución tecnológica específica, sino que aporta evidencia a favor de un cambio de paradigma en el diseño de sistemas de tutoría inteligente, orientados a empoderar al estudiante como agente activo y autónomo de su propio aprendizaje.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones de este estudio confirman que el diseño e implementación de un Sistema de Tutoría Inteligente orientado explícitamente a la autorregulación del aprendizaje constituye una contribución relevante tanto para la investigación en inteligencia artificial educativa como para la práctica pedagógica en la Educación Superior. El sistema SARA, fundamentado en un modelo bayesiano dinámico de doble capa que integra el conocimiento del dominio y las fases clave de la autorregulación, demuestra que es posible trascender los enfoques tradicionales de adaptación centrados exclusivamente en el rendimiento cognitivo.

Los resultados evidencian que los estudiantes que interactuaron con SARA no solo alcanzaron mejores niveles de aprendizaje en el dominio de estadística, sino que desarrollaron conductas más consistentes con un aprendizaje autorregulado. Este hallazgo es especialmente significativo, ya que el objeto central del estudio no fue únicamente mejorar el desempeño académico inmediato, sino promover competencias metacognitivas que permitan a los estudiantes gestionar de manera más consciente y autónoma su proceso de aprendizaje. En este sentido, el sistema logró articular

de forma efectiva el aprendizaje del contenido con el fortalecimiento de habilidades de planificación, supervisión y reflexión, confirmando la validez del enfoque propuesto.

Desde una perspectiva metodológica y computacional, el uso de redes bayesianas dinámicas se consolida como una estrategia adecuada para modelar procesos complejos y latentes como la autorregulación del aprendizaje. La mayor precisión predictiva del modelo integrado pone de manifiesto que las variables autorregulatorias aportan información sustantiva para comprender el comportamiento del estudiante y anticipar su desempeño. Esto refuerza la idea de que los modelos de estudiante deben evolucionar hacia representaciones más holísticas, capaces de capturar no solo lo que el estudiante sabe, sino cómo aprende y cómo regula su esfuerzo.

Asimismo, la coherencia entre los indicadores conductuales observados y las percepciones autorreportadas por los estudiantes sugiere que las intervenciones generadas por el sistema no operaron únicamente a nivel instrumental, sino que favorecieron una mayor conciencia metacognitiva. Este aspecto es clave para el objeto de estudio, ya que la autorregulación efectiva implica no solo la ejecución de estrategias, sino también la comprensión y apropiación de estas por parte del aprendiz.

En términos aplicados, los resultados del estudio posicionan a SARA como una herramienta con alto potencial para apoyar a docentes e instituciones en contextos caracterizados por la masificación y la diversidad estudiantil. Al ofrecer retroalimentación personalizada y oportuna sobre los procesos de aprendizaje, el sistema contribuye a reducir la dependencia del acompañamiento tutorial individual y a fomentar una mayor autonomía en los estudiantes.

En conclusión, esta investigación demuestra que integrar la autorregulación del aprendizaje como un objetivo explícito en sistemas adaptativos basados en inteligencia artificial no solo mejora los resultados académicos, sino que promueve aprendizajes más profundos, conscientes y sostenibles. De este modo, el estudio aporta evidencia empírica y conceptual que respalda un cambio de paradigma en el diseño de Sistemas de Tutoría Inteligente, orientados a formar aprendices capaces de aprender de manera autónoma a lo largo de su trayectoria académica y profesional.

## REFERENCES

- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-based research: A decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25.  
<https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Azevedo, R., Harley, J., Trevors, G., Duffy, M., Feyzi-Behnagh, R., Bouchet, F., & Landis, R. (2013). Using trace data to examine the complex roles of cognitive, metacognitive, and emotional self-regulatory processes during learning with multi-agent systems. In R. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_28)
- Azevedo & V. Aleven (Eds.), *International handbook of metacognition and learning technologies* (pp. 427–449). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3_28)
- Azevedo, R., & Aleven, V. (Eds.). (2013). *International handbook of metacognition and learning technologies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5546-3>
- Broadbent, J., & Poon, W. L. (2015). Self-regulated learning strategies and academic achievement in online higher education learning environments: A systematic review. *The Internet and Higher Education*, 27, 1–13.  
<https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2015.04.007>

- Corbett, A. T., & Anderson, J. R. (1994). Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 4(4), 253–278. <https://doi.org/10.1007/BF01099821>
- Csikszentmihalyi, M., & Nakamura, J. (2014). The dynamics of intrinsic motivation. In M. Csikszentmihalyi, *Flow and the foundations of positive psychology* (pp. 175–197). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9088-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9088-8_12)
- Ma, W., Adesope, O. O., Nesbit, J. C., & Liu, Q. (2014). Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 106(4), 901–918. <https://doi.org/10.1037/a0037123>
- Millán, E., Loboda, T., & Pérez-de-la-Cruz, J. L. (2010). Bayesian networks for student model engineering. *Computers & Education*, 55(4), 1663–1683. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.07.010>
- Panadero, E. (2017). A review of self-regulated learning: Six models and four directions for research. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 422. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00422>
- Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann.
- Pintrich, P. R., Smith, D. A., García, T., & McKeachie, W. J. (1991). *A manual for the use of the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ)*. National Center for Research to Improve Postsecondary Teaching and Learning.
- Roll, I., Aleven, V., McLaren, B. M., & Koedinger, K. R. (2011). Improving students' help-seeking skills using metacognitive feedback in an intelligent tutoring system. *Learning and Instruction*, 21(2), 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2010.07.004>

Schunk, D. H., & Zimmerman, B. J. (Eds.). (2011). *Handbook of self-regulation of learning and performance*. Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9780203839010>