



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y ESTADÍSTICA  
SECRETARIA DE CIENCIA Y TECNOLOGIA E INSTITUTOS DE INVESTIGACIONES

# **Resumen Ampliado**

*Jornadas Anuales*

*“Investigaciones en la Facultad” de  
Ciencias Económicas y Estadística*



UNR

**De Vito, Marcos L.; Arnesi, Nora E.; Boggio, Gabriela S.**

*Instituto de Investigaciones Teóricas y Aplicadas de la Escuela de Estadística.*

## **ESTUDIO DEL TRAMO INICIAL DE LAS TRAYECTORIAS ACADÉMICAS DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA MEDIANTE CADENAS DE MARKOV<sup>1</sup>**

### **Resumen:**

En este trabajo se modeló el tramo inicial de las trayectorias académicas de estudiantes de Ingeniería Industrial mediante Cadenas de Markov Absorbentes. Se analizó una cohorte de 259 ingresantes en 2014 durante 12 cuatrimestres. Como propuesta metodológica innovadora, se definieron los estados de la cadena como conjuntos específicos de asignaturas aprobadas del ciclo básico de Matemática (Cálculo I, Álgebra y Geometría, Cálculo II, III, IV y Álgebra Lineal), permitiendo identificar nodos críticos con precisión. Se estableció una definición operativa de abandono basada en inactividad académica. Los resultados mostraron que cuando no se tiene ninguna asignatura aprobada, las probabilidades de abandono y de completar el ciclo son similares. Sin embargo, una vez aprobadas las dos materias de Matemática del primer cuatrimestre del plan de estudios, la probabilidad de completar el ciclo aumenta sustancialmente a 0,88. La probabilidad de persistencia en el estado inicial es 0,53, sugiriendo alta dificultad inicial. La asignatura Álgebra y Geometría Analítica emerge como nodo de mayor dificultad temprana. Los hallazgos indicaron que intervenciones institucionales deben focalizarse en los períodos iniciales para maximizar retención. Los resultados se presentan bajo el supuesto de homogeneidad temporal y propiedad markoviana, cuya validación formal constituye trabajo futuro.

Palabras clave: Trayectorias académicas, Cadenas de Markov Absorbentes, Carrera de Ingeniería, Abandono universitario.

### **Abstract:**

In this study, the early stage of the academic trajectories of Industrial Engineering students was modeled using Absorbing Markov Chains. A cohort of 259 students entering in 2014 was tracked over 12 semesters. As an innovative methodological contribution, the states of the chain were defined as specific sets of mathematics courses completed within the basic cycle (Calculus I, Algebra and Analytic Geometry, Calculus II, III, IV, and Linear Algebra), enabling the precise identification of critical nodes. An operational definition of dropout based on academic inactivity was established. The results indicate that, when no mathematics course has been completed, the probabilities of dropping out and completing the cycle are similar. However, once the two mathematics courses from the first semester of the curriculum have been completed, the probability of completing the cycle increases substantially to 0.88. The probability of remaining in the initial state is 0.53, suggesting significant early difficulty. Algebra and Analytic Geometry emerges as the course associated with the greatest early obstruction. The findings suggest that institutional interventions should focus on the earliest stages to maximize student retention. Results are presented under the assumptions of temporal homogeneity and the Markov property, whose formal validation is proposed as future work.

Keywords: Academic trajectories; Absorbing Markov Chains; Engineering education; University dropout.

---

<sup>1</sup> Trabajo elaborado en el marco del Proyecto 80020220700095UR, titulado: "Modelización estadística para estructuras complejas de datos", dirigido por la Dra. Gabriela S. Boggio.

## Introducción

En las últimas décadas, el sistema universitario argentino ha experimentado un proceso de expansión sostenida, particularmente en carreras de Ingeniería. Diversos programas nacionales, como el Programa de Mejoramiento de las Ingenierías (PROMEI) y el Plan Estratégico de Formación de Ingenieros (PEFI), han contribuido a incrementar el acceso a estas carreras, logrando un crecimiento significativo en la matrícula de primer año. Sin embargo, este aumento no se ha traducido en una mejora proporcional de los indicadores de retención y graduación, lo que refleja una persistente problemática de abandono y prolongación en la duración de las trayectorias académicas (Patriarca, 2016). En este contexto, el estudio de la dinámica de cursado y aprobación de asignaturas mediante el análisis de trayectorias académicas se constituye como herramienta fundamental para identificar puntos críticos y dimensionar la duración real de los recorridos curriculares propuestos en los planes de estudio de carreras universitarias.

La literatura internacional ha mostrado que tanto el abandono como el progreso académico poseen naturaleza dinámica y pueden modelarse eficazmente mediante Cadenas de Markov. Estudios destacados (Brezavšček *et al.*, 2017; Nicholls, 2007; Tedeschi *et al.*, 2023; Witteveen & Attewell, 2017) han explorado diferentes variantes de estos modelos para describir y predecir trayectorias educativas en distintos contextos. En el ámbito nacional, en cambio, las aplicaciones de procesos estocásticos a la problemática de trayectorias universitarias son muy escasas, destacándose Palazzesi (2023), quien utiliza Cadenas de Markov absorbentes. Predominan enfoques basados en regresiones (Carella *et al.*, 2016), análisis de supervivencia (Boggio *et al.*, 2018) o métodos supervisados (Bossiero *et al.*, 2016).

El presente trabajo busca indagar sobre los siguientes interrogantes: ¿qué tanto se diferencian los trayectos reales seguidos por estudiantes de los esperados según planes de estudio?, ¿qué asignaturas representan mayor riesgo de abandono? y ¿es igualmente probable que un estudiante abandone en cualquier momento de la carrera o existen períodos más críticos? Para responderlos, se propone como objetivo modelar las trayectorias académicas de estudiantes mediante Cadenas de Markov, contribuyendo a esta línea de investigación con un enfoque innovador. A diferencia de muchos enfoques tradicionales que emplean variables cuantitativas o agregadas (créditos acumulados, años cursados, cantidad total de materias aprobadas, etapa de la carrera alcanzada), aquí se propone definir los estados de la cadena como conjuntos específicos de asignaturas aprobadas. Esta elección metodológica permite identificar con precisión las materias que constituyen nodos críticos en la progresión curricular, aportando información de alto valor para orientar políticas de apoyo académico. En particular, se propone analizar el tramo inicial de las trayectorias de estudiantes de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR). Este recorte responde al interés institucional por el ciclo básico y, en particular, por las asignaturas de Matemática. El estudio busca aportar evidencia empírica que fortalezca el mejoramiento continuo de las políticas de acompañamiento y rediseño curricular.

Asimismo, se introduce una definición operativa de abandono de la carrera basada en el análisis de períodos de inactividad académica, lo que garantiza criterios claros y reproducibles para clasificar trayectorias absorbidas por dicho estado. Los resultados preliminares que se presentan en esta publicación se obtuvieron bajo el supuesto de homogeneidad y cumplimiento de la propiedad markoviana. En esta primera aproximación, el objetivo es mostrar la potencialidad del modelo para generar evidencia que contribuya al diseño de intervenciones institucionales, focalizadas en los tramos más críticos de las carreras.



UNR

## Metodología

El modelo propuesto está basado en la teoría de Cadenas de Markov Absorbentes. Formalmente, sea  $\{X_n: n \in \mathbb{N}_0\}$  un proceso estocástico con espacio paramétrico discreto y definido sobre un espacio de estados finito  $\mathcal{S}$ , donde  $X_n$  representa el estado del sistema en el momento  $n$ . Se dice que  $\{X_n\}$  constituye una cadena de Markov si cumple la propiedad markoviana:

$$P(X_{n+1} = j_{n+1} | X_0 = j_0, X_1 = j_1, X_n = j_n) = P(X_{n+1} = j_{n+1} | X_n = j_n)$$

En este caso,  $P(X_{n+1} = j | X_n = i) = p_{ij}$  se define como la probabilidad de transición desde estado inicial  $i$  al estado final  $j$  ( $i, j \in \mathcal{S}$ ) en una etapa y constituye el elemento genérico de la matriz de transición de estados  $P(p_{ij})$ . Una cadena se dice homogénea si las probabilidades de transición  $p_{ij}$  no dependen del momento  $n$  en que ocurren. Se denomina cadena absorbente si existe al menos un estado  $s \in \mathcal{S}$  alcanzable desde algún otro estado y tal que  $p_{ss} = 1$ . Los estados absorbentes representan situaciones terminales del proceso, mientras que los restantes se consideran estados transitorios.

El estudio se focaliza en la cohorte 2014 de la carrera de Ingeniería Industrial de la FCEIA - UNR. La ventana de observación se extendió a lo largo de 12 cuatrimestres, desde el primer semestre de 2014 hasta el segundo semestre de 2019. La cohorte mencionada se selecciona por tres razones metodológicas: (i) disponer de una ventana de observación amplia, (ii) ser la primera cohorte del nuevo plan de estudios, que reorganizó las asignaturas del área de Matemática respecto del plan anterior y (iii) evitar la distorsión de los años 2020 y 2021 (pandemia), que alteró condiciones de cursado, evaluación y aprobación.

Los datos utilizados provienen de registros administrativos extraídos del sistema SIU-Guaraní que incluyen tres fuentes principales: listado de aspirantes, inscripciones a cursada y exámenes rendidos. A partir de un proceso de depuración se identificaron 268 ingresantes genuinos, de los cuales se excluyeron 9 por inconsistencias en la secuencia de aprobación de asignaturas, conformando una población final de 259 estudiantes.

La definición de los estados del proceso constituye un aspecto central de la propuesta metodológica. En lugar de recurrir a variables cuantitativas (como cantidad total de materias aprobadas) o agregadas (como ciclo de la carrera aprobado), se eligió definir los estados como conjuntos específicos de asignaturas aprobadas del ciclo básico de Matemática: Cálculo I (C1), Álgebra y Geometría Analítica (AG), Cálculo II (C2), Cálculo III (C3), Álgebra Lineal (AL) y Cálculo IV (C4). Este criterio permite capturar la secuencia exacta de progresión académica e identificar con detalle qué asignaturas funcionan como nodos críticos para el avance curricular.

Un segundo componente metodológico clave es la definición operativa de abandono, establecida a partir del análisis de inactividad académica. Se consideró que un estudiante se encuentra inactivo en un cuatrimestre cuando no registra inscripciones a cursada ni exámenes rendidos en el mismo. El estudio de estos períodos mostró que ningún estudiante de la cohorte retornó luego de más de cuatro cuatrimestres consecutivos sin actividad. A partir de este hallazgo, se adoptó como criterio de abandono la acumulación de al menos 4 cuatrimestres de inactividad ininterrumpida. Este umbral fue validado mediante métricas de sensibilidad y especificidad, que arrojaron un equilibrio adecuado (90,3% y 95,5% respectivamente), y se incorporó el "Abandono" como uno de los estados absorbentes del modelo.



El modelo resultante se formalizó como una Cadena de Markov Finita Homogénea Absorbente (CMFH) con 13 estados, donde:

$X_n$ : conjunto de asignaturas aprobadas al final del cuatrimestre  $n$ .

$S = \{ "0" , "AG" , "C1" , "C1-AG" , "C1-C2" , "C1-AG-AL" , "C1-AG-C2" , "C1-AG-C2-AL" , "C1-AG-C2-C3" , "C1-AG-C2-AL-C3" , "C1-AG-C2-AL-C4" , "Ciclo completado" , "Abandono" \}$

El estado "0" representa que el estudiante no tiene ninguna asignatura aprobada. Los estados "Ciclo completado" (todas las asignaturas en estudio aprobadas) y "Abandono" (inactividad académica irreversible) son absorbentes y el resto son estados transitorios.

Para cada estudiante se determinaron, cuatrimestre a cuatrimestre, los estados inicial y final, y con esta información se estimaron las probabilidades  $p_{ij}$  de la matriz de transición de estados de la cadena. Es importante señalar que los resultados que se presentan en esta etapa se obtuvieron bajo el supuesto de homogeneidad y cumplimiento de la propiedad markoviana. Es decir, se asume que las probabilidades de transición se mantienen constantes en el tiempo y que el conjunto de asignaturas que un estudiante tiene aprobadas al final de un cuatrimestre depende únicamente del conjunto de asignaturas que tenía aprobadas al finalizar el cuatrimestre anterior. La validación de estos supuestos se realizará en una etapa posterior y, en caso de detectarse incumplimientos, se evaluarán estrategias metodológicas alternativas (Crippa *et al.*, 2016).

### Resultados

La matriz de transición de estados  $P_{13 \times 13}$  del modelo contiene las probabilidades de transición desde cada estado de partida a cada estado de llegada en una etapa. Esta información puede representarse mediante un diagrama de transición de estados (Figura 1).

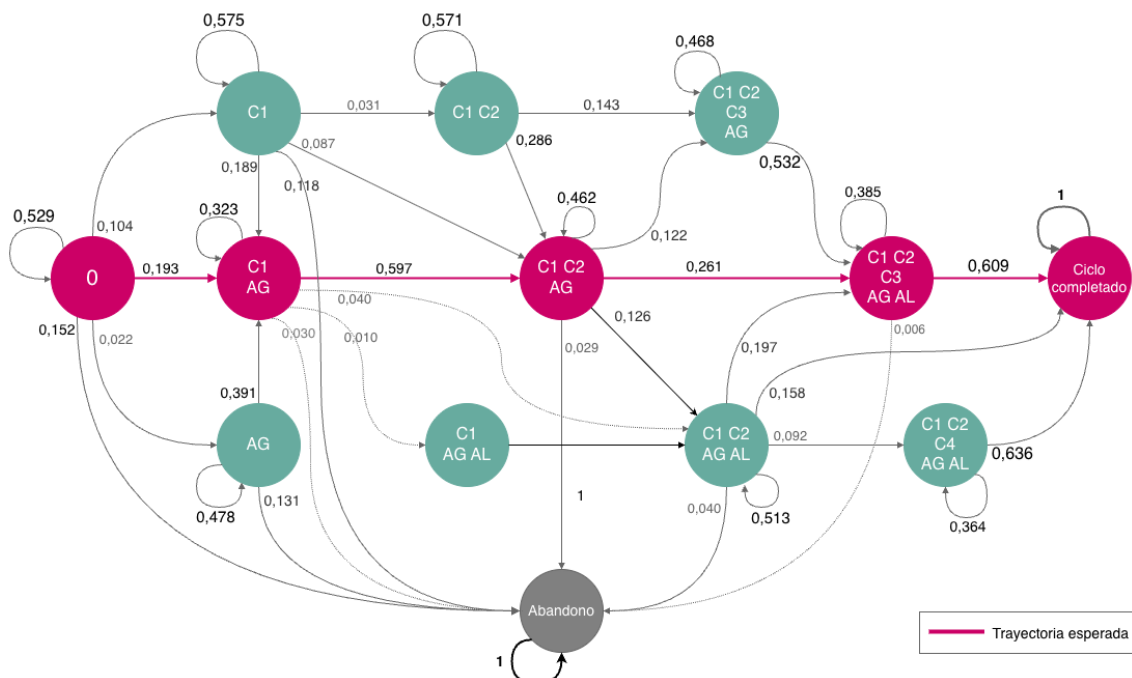
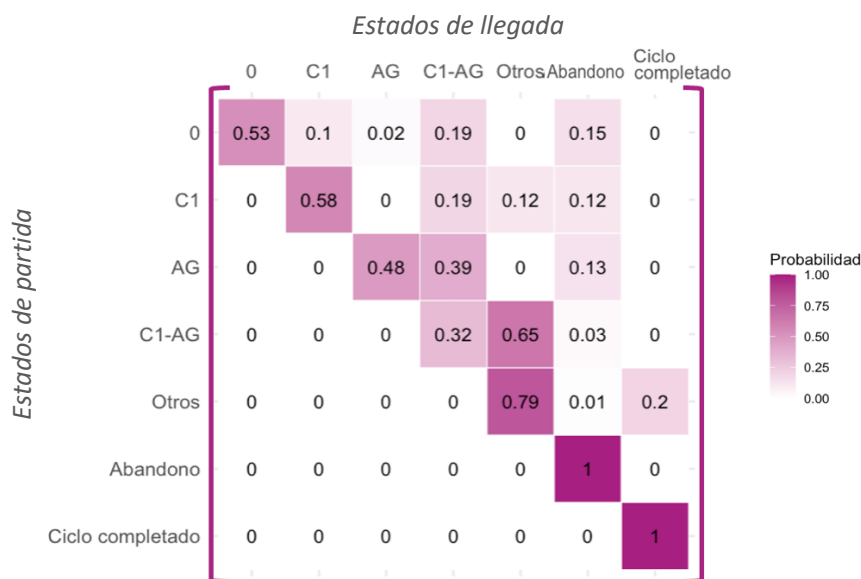


Figura 1. Probabilidades estimadas de transición de la cadena.



Con el fin de analizar la etapa más temprana de la carrera, se estudian primero las trayectorias que involucran a las asignaturas del primer cuatrimestre (Cálculo I y Álgebra y Geometría Analítica). Para facilitar la lectura del comportamiento temprano de las trayectorias sin perder la naturaleza estocástica de  $P$ , se presenta una matriz  $7 \times 7$  con filas/columnas que involucran a estas asignaturas, a los estados absorbentes ("Ciclo completado" y "Abandono") y se incluye un estado "Otros" que colapsa, en una única columna/fila, la probabilidad de transitar hacia o provenir de estados que involucran asignaturas fuera del primer cuatrimestre (Figura 2).



**Figura 2.** Probabilidades estimadas de transición a una etapa entre estados de partida y llegada.

Si en un cuatrimestre un estudiante parte del estado "0" (ninguna asignatura aprobada), lo más probable (0,53) es que permanezca en ese estado al final del mismo. Esta persistencia en el estado "0" da cuenta de la dificultad para aprobar al menos una de las dos asignaturas iniciales de Matemática. Entre quienes aprueban sólo una de esas asignaturas, la probabilidad de que sea Cálculo I es muy superior a la de que sea Álgebra y Geometría Analítica. Se observa una mayor persistencia en el estado "C1" (0,58) que en "AG" (0,48), lo que sugiere que "salir" de "C1" —lo que requiere aprobar "AG"— cuesta más que salir de "AG" —aprobando "C1"—. En la misma línea, la transición hacia "C1-AG" es bastante menos probable si se parte de "C1" (0,19) que si se parte de "AG" (0,39). En conjunto, estos patrones convergen en señalar a Álgebra y Geometría Analítica como nodo de mayor dificultad en el arranque de la carrera.

Adicionalmente, a partir de la matriz de transición  $P_{13 \times 13}$  se estimaron las probabilidades de absorción hacia cada estado absorbente (Figura 3). Desde el estado inicial ("0"), la probabilidad de que eventualmente el estudiante abandone es 0,47 (y de que complete el ciclo de Matemática es 0,53); a medida que se aprueban asignaturas, la probabilidad de abandono disminuye marcadamente. Por ejemplo, desde "C1-AG" la probabilidad de completar el ciclo asciende a 0,88 (complementariamente, la de abandono disminuye a 0,12). En estados avanzados, cuando se tienen 3 o 4 de las 6 asignaturas aprobadas, la finalización del ciclo es altamente probable. Estos resultados refuerzan que las instancias iniciales de la carrera son las más críticas y sugieren dirigir los esfuerzos institucionales a favorecer la aprobación temprana de las asignaturas del primer cuatrimestre.



Figura 3. Probabilidades estimadas de absorción para diferentes estados de partida.

### Consideraciones finales

El enfoque de Cadenas de Markov permite describir la dinámica de las trayectorias iniciales que siguen estudiantes con indicadores interpretables y comparables a través de probabilidades de transición y probabilidades de absorción. Ello ofrece una lectura integral del ciclo básico de Matemática de la carrera de Ingeniería Industrial.

La definición de los estados de la cadena como conjuntos específicos de asignaturas se presenta como un enfoque metodológico que permite identificar particularidades de las asignaturas consideradas. Además, junto con el análisis y la definición operacional de abandono, aporta criterios reproducibles para contrastar cohortes y carreras.

Desde una perspectiva institucional, el modelo habilita un diagnóstico temprano y focalizado en nodos curriculares, orientando intervenciones de acompañamiento y ajustes pedagógicos allí donde la evidencia sugiere mayor dificultad.

Estos resultados deben leerse como avances condicionados a los supuestos de homogeneidad temporal y propiedad markoviana. Como trabajo futuro inmediato se prevé la validación formal de estos supuestos y, de corresponder, la adopción de variantes metodológicas.

## Referencias Bibliográficas

Boggio, G., Arnesi, N., Harvey, G., Ruiz, L., & Angelini, J. (2018). Una respuesta metodológica para el estudio del rendimiento académico en la Facultad de Ciencias Económicas y Estadística, Universidad Nacional de Rosario, Argentina. *SaberEs*, 10(2). <https://doi.org/10.35305/s.v10i2.190>

Bossero, J., Edwards, D., & Pérez, S. N. (2016). *Predicción del riesgo de abandono universitario utilizando métodos supervisados*. V Jornadas Nacionales y I Latinoamericanas de Ingreso y Permanencia en Carreras Científico-Tecnológicas, Bahía Blanca, Argentina.

Brezavšček, A., Bach, M. P., & Baggia, A. (2017). Markov Analysis of Students' Performance and Academic Progress in Higher Education. *Organizacija*, 50(2), 83-95. <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0006>

Carella, L., Solari, E., & Morano Germani, L. (2016). *Determinantes del rendimiento académico en el primer año de la carrera. Estudio de caso: Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de La Plata*. IV Encuentro Nacional de Servicios de Orientación Universitaria "Hacia una mirada interdisciplinaria" (UNLP, 27 y 28 de octubre de 2016). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/153803>

Crippa, F., Mazzoleni, M., & Zenga, M. (2016). Departures from the formal of actual students' university careers: An application of non-homogeneous fuzzy Markov chains. *Journal of Applied Statistics*, 43(1), 16-30. <https://doi.org/10.1080/02664763.2015.1091446>

Nicholls, M. G. (2007). Assessing the Progress and the Underlying Nature of the Flows of Doctoral and Master Degree Candidates Using Absorbing Markov Chains. *Higher Education*, 53(6), 769-790. <https://doi.org/10.1007/s10734-005-5275-x>

Palazzesi, V. O. (2023). *Análisis de la dinámica de la trayectoria estudiantil mediante Cadenas de Markov Absorbentes. Caso: Profesorado para la Educación Secundaria en Matemática, Instituto de Enseñanza Superior Simón Bolívar*. Universidad Nacional de Córdoba. <http://hdl.handle.net/11086/548796>

Patriarca, C. (2016). Acceso, permanencia y graduación en el área de las ingenierías: Un análisis de política universitaria a través del Plan Estratégico de Formación de Ingenieros -PEFI-. *IX Jornadas de Sociología de la Universidad Nacional de La Plata*. [http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab\\_eventos/ev.9232/ev.9232.pdf](http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.9232/ev.9232.pdf)

Tedeschi, M. N., Hose, T. M., Mehlman, E. K., Franklin, S., & Wong, T. E. (2023). Improving models for student retention and graduation using Markov chains. *PLOS ONE*, 18(6), e0287775. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0287775>

Witteveen, D., & Attewell, P. (2017). The College Completion Puzzle: A Hidden Markov Model Approach. *Research in Higher Education*, 58(4), 449-467. <https://doi.org/10.1007/s11162-016-9430-2>