

Proposal to prioritize the improvement of rural roads based on sustainable criteria: A Chilean case

Leonardo Sierra Varela¹ ; Alvaro Filun Santana¹ ; José Mardones Ayelef¹ ; Felipe Araya Araya² 

¹ Universidad de La Frontera, Chile, leonardo.sierra@uf Frontera.cl, a.filun01@uf fromail.cl, j.mardones06@uf fromail.cl,

² Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, felipe.araya@usm.cl

Abstract– *In Latin America, rural road construction and improvement programs have been implemented to improve traffic flow and reduce dust, mud, and noise. However, conventional criteria for evaluating public investment do not adequately reflect the needs of rural areas. In these contexts, aspects such as rural-urban integration, access to education and healthcare, environmental protection, and local identity are more relevant than travel times or traffic volumes. Within this framework, a multi-criteria evaluation method is proposed to prioritize rural road improvements that maximize their contribution to sustainable territorial development. The methodology integrates multi-criteria and multi-objective decision-making techniques, optimizing alternatives using the Manhattan distance, and is complemented by a fuzzy cognitive map to analyze the dynamic behavior of the selected solutions. The proposal is applied to a case study in the Araucanía Region of Chile, where fifteen roads are selected from a sample of 101. The analysis considers 16 criteria and 27 indicators analyzed between the years 2019 and 2024, and associated with the social, environmental, technical, and economic dimensions of sustainability.*

Keywords– *Rural roads, Sustainable development, Multicriteria, Chile.*

Propuesta para priorizar la mejora de caminos rurales en base a criterios sostenibles: Un caso chileno

Leonardo Sierra Varela¹ ; Alvaro Filun Santana¹ ; José Mardones Ayelef¹ ; Felipe Araya Araya² 

¹ Universidad de La Frontera, Chile, leonardo.sierra@ufroterra.cl, a.filun01@ufroterra.cl, j.mardones06@ufroterra.cl,

² Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, felipe.araya@usm.cl

Resumen— En América Latina se han impulsado programas de construcción y mejoramiento de caminos rurales orientados a mejorar la circulación y reducir polvo, barro y ruido. Sin embargo, los criterios convencionales de evaluación de la inversión pública no reflejan adecuadamente las necesidades del territorio rural. En estos contextos, aspectos como la integración campo-ciudad, el acceso a la educación y a la salud, la protección ambiental y la identidad local resultan más relevantes que los tiempos de viaje o los volúmenes de tránsito. En este marco, se propone un método de evaluación multicriterio para priorizar los mejoramientos de los caminos rurales que maximice su contribución al desarrollo territorial sostenible. La metodología integra técnicas de decisión multicriterio y multiobjetivo, optimizando las alternativas mediante la distancia de Manhattan, y se complementa con un mapa cognitivo difuso para analizar el comportamiento dinámico de las soluciones seleccionadas. La propuesta se aplica a un estudio de caso en la Región de La Araucanía, Chile, en el que se seleccionan quince caminos a partir de una muestra de 101 caminos. El análisis considera 16 criterios y 27 indicadores analizados entre los años 2019 y 2024, y asociados a las dimensiones social, ambiental, técnica y económica de la sostenibilidad

Palabras clave— Caminos rurales, Desarrollo sostenible, Multicriterio, Chile.

I. INTRODUCCIÓN

En América Latina, los sectores rurales presentan un escenario de alta vulnerabilidad, donde las políticas de desarrollo y el presupuesto público suelen ser secundarios frente al crecimiento de las ciudades. Las condiciones que agravan esta situación incluyen la falta de acceso a la educación, la salud y los mercados [1]. En este ámbito, los caminos rurales desempeñan un papel crucial, pues el desarrollo depende de la interacción simultánea entre la infraestructura vial, los sectores productivos y el hábitat natural y social [2]. De hecho, se ha propuesto que el acceso vial puede compensar la carencia de otros activos públicos y privados en zonas postergadas [3].

En el caso de Chile, al año 2023 la red vial es de 88,210 km, de los cuales el 52,8% aún es de tierra o ripio, siendo las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos las que presentan el mayor déficit [4]. Como respuesta, en 2003 se creó el programa de Caminos Básicos para mejorar rutas con baja demanda de tráfico. A la fecha, este programa ha construido más de 15,000 km, generando consecuencias positivas como la mejora en la calidad de vida, reducción de la

polución, potenciación del turismo rural y dinamización del desarrollo local [5].

A pesar de la relevancia de estas inversiones, la toma de decisiones para su asignación carece de criterios claramente medibles o de una estructura que defina su aporte real al territorio [6]. El problema central es que la evaluación de infraestructura rural en América Latina no se ajusta a los patrones convencionales de los sistemas nacionales de inversión pública basados en el análisis de costo-beneficio (ACB) [1]. Bajo este enfoque, los términos monetarios y ahorros de tiempo pierden sentido en contextos rurales, mientras que factores trascendentales como la cultura y la identidad social son habitualmente omitidos por los sistemas tradicionales [7]. Asimismo, el ACB presenta dificultades para tratar externalidades no monetarias y limita la participación de los actores sociales en el proceso evaluativo [8].

Aunque la sostenibilidad es hoy una ciencia multidisciplinar con enfoque holístico [9] que requiere un sistema integrado de variables sociales, económicas, ambientales y técnicas [10], existe una brecha metodológica significativa. Investigaciones previas han determinado criterios de sostenibilidad para caminos rurales mediante lógica neutrosófica [11], pero persiste la necesidad de un mecanismo que represente la contribución tanto de corto como de largo plazo.

Los métodos actuales presentan limitaciones: el método de entropía se ha focalizado solo en aportes de corto plazo [12] y sistemas como ENVISION o CEEQUAL ignoran la participación y variables externas que modifican el ciclo de vida [10]. Por otro lado, la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) requiere bases de datos como los social hotspots que son costosas y difíciles de extrapolar a contextos locales específicos [13]. Además, la mayoría de los estudios multicriterio se han centrado en enfoques estáticos a través de representaciones independientes —pobreza, mantenimiento o seguridad— [14, 15, 16], sin considerar que las variables de sostenibilidad son interdependientes y sus efectos mutuos inciden en el valor que la sociedad aporta al proyecto a lo largo del tiempo [17, 18].

Dada la falta de información en contextos rurales, que limita la toma de decisiones, se requiere el uso de procesos de participación y sistemas blandos para explicar los impactos en estos entornos [17, 19, 20, 21, 22]. Una alternativa eficiente son los Mapas Cognitivos Difusos (MCD), que permiten

capturar interacciones dinámicas incluso con acceso limitado a bases de datos cuantitativas [23, 24, 25, 26].

En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo proponer un mecanismo de evaluación y priorización de caminos rurales que considere el aporte estático y dinámico a la sostenibilidad territorial. Para ello, se integran técnicas multicriterio, multiobjetivo y modelos cognitivos difusos, que permiten representar comportamientos dinámicos y relaciones causales superando la dificultad de acceso a datos a través de la participación de expertos [23, 19, 16].

II. METODOLOGIA Y APLICACIÓN

En esta sección se presentan los métodos para evaluar la contribución estática y dinámica de los caminos al desarrollo territorial sostenible. Este mecanismo requiere del soporte de un modelo de evaluación multicriterio determinada por las condiciones del contexto, las características del tipo de infraestructuras y de su localización. A partir de este modelo se desprende un mecanismo de evaluación estático (A), dinámico (B) y una priorización (C). El método estático involucra un conjunto de indicadores y criterios jerárquicos ponderados que permiten estimar la contribución de cada dimensión de la sostenibilidad (ambiental, técnico, económica y social) en un tiempo actual (t_0). El método dinámico considera las interacciones causales entre los indicadores. Esto permite calcular el efecto progresivo de las interacciones en cada instante k , debido al efecto que unos indicadores tienen sobre otros, a partir de los valores iniciales estáticos y de un conjunto optimizado de caminos. A partir de comportamiento dinámico se procesan los indicadores en cada tk para priorizar los caminos seleccionados de acuerdo a su distancia a un ideal y determinar su comportamiento temporal. En la Fig. 1 se ilustra el método de evaluación en las etapas A, B y C.

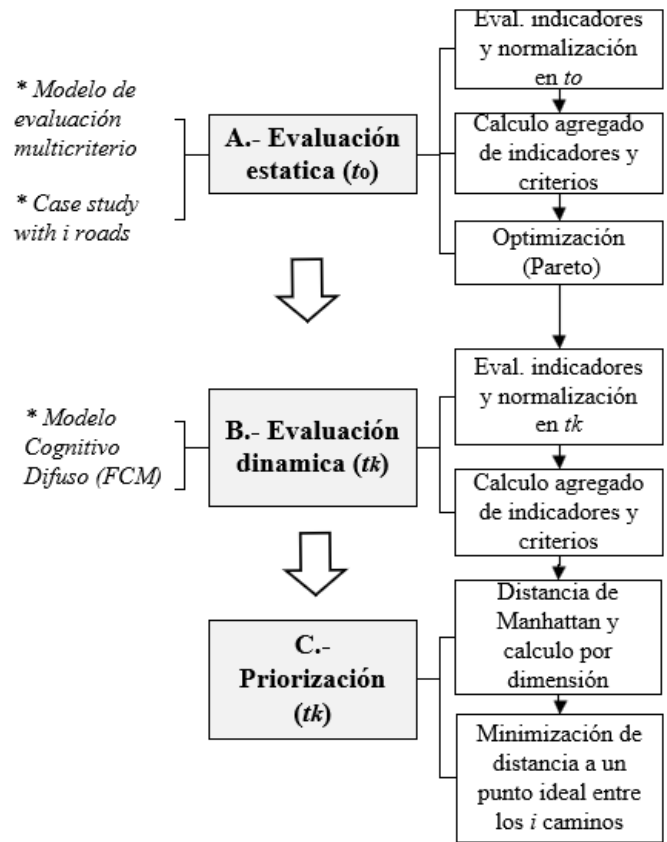


Fig. 1 Método propuesto de evaluación de caminos rurales

Específicamente para la evaluación estática (t_0), se utilizan indicadores normalizados de la base de datos regional [27], agregados por criterio y dimensión mediante la técnica SAW [28] y pesos predefinidos [11]. A partir de estos resultados, se aplica una optimización multiobjetivo mediante el óptimo de Pareto, lo que permite identificar un subconjunto de infraestructuras eficientes donde no es posible mejorar una dimensión de sostenibilidad sin degradar otra [29].

Posteriormente, se configura un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) que integra el conocimiento de 45 expertos multidisciplinarios para modelar relaciones de causa-efecto en condiciones de información vaga o incompleta [30]. Los pesos de interconexión (W_{jr}), que oscilan entre $[-1, 1]$, representan la fuerza de la causalidad y se determinan mediante un Sistema de Inferencia Borrosa (SIB) de tipo Mamdani con distribución triangular [31, 32].

El análisis dinámico evalúa el comportamiento de los caminos Pareto-óptimos en distintos tiempos (t_k). El valor de cada indicador (A_r) se actualiza iterativamente considerando las influencias del sistema y aplicando una función umbral sigmoide para garantizar la estabilidad [33, 34], según las ecuaciones (1) y (2).

$$A_r^{t+1} = f(A_r^t + \sum_{r=1, r \neq j}^n W_{jr} \times A_j^t) \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

Donde A_r^{t+1} es el valor del indicador en el tiempo $t+1$, W_{jr} es el peso de interconexión y λ controla la pendiente de la curva de transferencia [34].

Finalmente, los caminos se priorizan según su proximidad a un punto ideal de sostenibilidad utilizando la distancia de Manhattan (Ecuación 3). Este modelo matemático evita la compensación entre dimensiones, seleccionando los proyectos con menor distancia (d_1) como aquellos con mayor contribución territorial [19]:

$$\text{Min}_{t_k} d_1 \quad (3)$$

$$d_{1i} = \lambda_T \left(\frac{TC^* - TC_i}{TC^* - TC_*} \right) + \lambda_S \left(\frac{SC^* - SC_i}{SC^* - SC_*} \right) + \lambda_{En} \left(\frac{EnC^* - EnC_i}{EnC^* - EnC_*} \right) + \lambda_{Ec} \left(\frac{EcC^* - EcC_i}{EcC^* - EcC_*} \right)$$

El caso de estudio analiza 101 caminos básicos en La Araucanía, Chile, región que posee el mayor déficit vial del país con un 75,6% de sus rutas compuestas por grava o tierra [4]. La muestra probabilística seleccionada abarca 976 km de proyectos ejecutados entre 2003 y 2017 [35]. Estas vías, con tránsitos inferiores a 150 vehículos diarios, resultan críticas para la conectividad de las comunidades indígenas y el acceso a servicios de salud y educación [5]. La evaluación emplea un modelo de 16 criterios y 27 indicadores que integran las dimensiones social, ambiental, técnica y económica, como se presenta en la Tabla 1[11]. Los datos que dan respuesta a los 27 indicadores surgen a partir de fuentes secundarias, encuestas y visitas de campo, utilizando pesos de trascendencia validados para capturar la complejidad del desarrollo territorial rural, y está disponible en [27]. Esta base de datos fue construida a partir del proyecto *Evaluación de la sostenibilidad dinámica y participativa para la toma de decisiones en proyectos básicos de carreteras rurales* [36].

Tabla 1 Estructura de indicadores para la evaluación sostenible de caminos rurales – Reg. Araucanía - Chile [11]

Ítems	Indicador	Dimensión
I1	Centros de reunión comunitaria.	Social
I2	Reconocimiento de valores culturales	Social
I3	Conectividad local y a comunidades indígenas.	Social
I4	Nivel de concentración de la población.	
I5	Calidad sanitaria	Social
I6	Tiempo ponderado de acceso a servicios de seguridad policial.	Social
I7	Tiempo ponderado de acceso a servicios de bomberos.	

Ítems	Indicador	Dimensión
I8	Acceso a infraestructura educacional.	Social
I9	Acceso a establecimientos de salud.	Social
I10	Diversidad e importancia de la Intersección con otros caminos.	Social
I11	Centros proveedores de servicios y bienes.	
I12	Condiciones de inseguridad del contexto.	
I13	Condiciones Técnicas de inseguridad del trazado.	Ambiental
I14	Impacto de la reducción de la Polución del camino.	
I15	Impacto de la reducción del ruido del camino.	
I16	Resguardo de las zonas protegidas.	Ambiental
I17	Resguardo de la Flora.	
I18	Resguardo de la Fauna.	
I19	Geometría del camino.	Técnico
I20	Tipo de carpeta existente.	
I21	Condiciones desfavorables para la construcción.	
I22	Condiciones climáticas desfavorables	Técnico
I23	Ejes equivalentes.	
I24	Potencialidad productiva.	Económico
I25	Potencialidad turística.	
I26	Rentabilidad del camino.	Económico
I27	Mantenimiento del camino (Ahorro).	Económico

III. ANALISIS DE RESULTADOS

Evaluación Estática y Optimización Multiobjetivo

La implementación del mecanismo propuesto en los 101 caminos de la muestra revela que las contribuciones medianas a las dimensiones de sostenibilidad técnica, económica, ambiental y social no superan el 20% en el tiempo inicial (t_0). Este bajo desempeño generalizado se debe a que las contribuciones por indicador y criterio suelen compensarse negativamente al agregar la totalidad de las variables del modelo [11]. No obstante, se identifican casos específicos, como el camino Liucura-Icalma, en el que el 38% de sus criterios superan el 50% de contribución, lo que evidencia que ciertos proyectos poseen fortalezas locales no capturadas por la media regional (Fig. 2).

Para un análisis integral de las dimensiones de la sostenibilidad, se aplicó una optimización multiobjetivo que dio lugar a 15 caminos eficientes o Pareto-óptimos (Fig. 3). Esta selección garantiza un equilibrio ético en el desarrollo sostenible, evitando la compensación entre dimensiones y asegurando que ninguna de las cuatro dimensiones (técnica, social, ambiental o económica) sea sacrificada en favor de otra [37, 10].

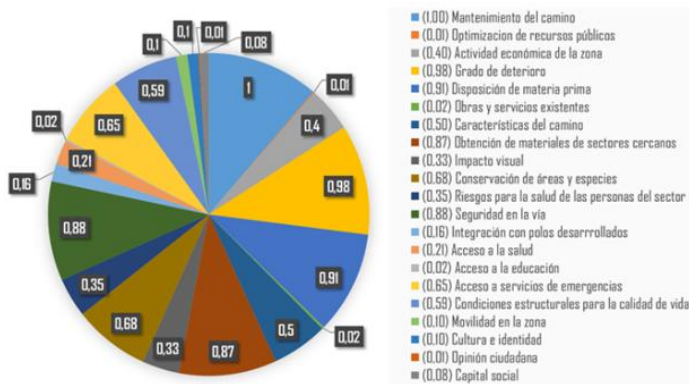


Fig. 2 Contribución de camino Liucura - Icalma

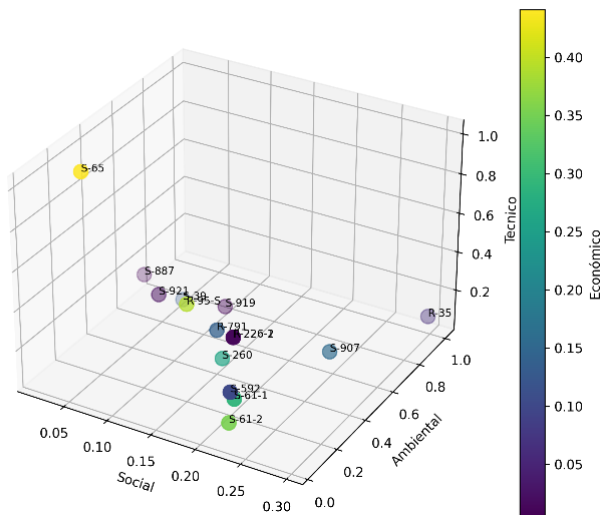


Fig. 3 Optimización de Pareto de contribuciones a la sostenibilidad de caminos rurales - 15 caminos eficientes

Interacción dinámica y comportamiento de largo plazo

Un Mapa Cognitivo Difuso (MCD) define el modelo de evaluación prospectivo de la contribución a la sostenibilidad de los caminos rurales, con el fin de evaluar su comportamiento a lo largo del tiempo. Este fue construido con la participación de 45 expertos y modela las interrelaciones causales entre los 27 indicadores. Este mapa se construye mediante una matriz de correlaciones que integra los juicios de valor de las interacciones entre los indicadores del conjunto de expertos y la implementación de un sistema de inferencia borrosa (Tabla 2). El sistema de participación y uso de la lógica difusa reduce la ambigüedad de las respuestas e incerteza del proceso, promueve el aprendizaje social y participativo tras ciclos de evaluación; al mismo tiempo que permite identificar escenarios futuros posibles y deseables facilitando la toma de decisiones estratégicas de largo plazo. En este sentido, esta propuesta es

atractiva en contexto y ámbitos de estudios poco explorados y que dependen de decisiones políticas o de convergencia social.

En este caso a través de la operación del MCD se identifica el comportamiento dinámico que alcanzó la estabilidad en 9 ciclos de iteración, lo que evidencia que la priorización a largo plazo difiere de los resultados estáticos. En particular, los caminos S907 y R35 mostraron una reducción progresiva de su distancia de Manhattan respecto del ideal de sostenibilidad territorial (Fig. 4). Mientras que el camino S907 es impulsado por las dimensiones social y económica, el camino R35 mejora su desempeño gracias a la sinergia entre los factores ambiental y económico [19]. De esta forma, el mecanismo de evaluación propuesto es replicable a otros contextos territoriales, en consideración a un conjunto de criterios e indicadores apropiados a dicho contexto y que son parte de cada caso de estudio.

IV. CONCLUSIONES

Esta investigación responde al objetivo planteado al proponer un mecanismo híbrido que evalúa la contribución estática y dinámica de los caminos rurales a la sostenibilidad territorial. El modelo integra el análisis multiobjetivo de Pareto y la distancia de Manhattan para identificar infraestructuras eficientes, complementándolas con Mapas Cognitivos Difusos para modelar el comportamiento de largo plazo mediante la interacción de indicadores.

Los hallazgos demuestran que, aunque las contribuciones iniciales suelen ser reducidas (menores al 20%), la interacción dinámica permite identificar proyectos con alto potencial de desarrollo, impulsados principalmente por factores económicos y sociales. Científicamente, el estudio contribuye con un marco metodológico que captura la complejidad y causalidad de la sostenibilidad mediante computación blanda, superando las limitaciones de los métodos estáticos tradicionales que ignoran la interdependencia de variables. En el ámbito práctico, se entrega a las agencias públicas una herramienta de decisión temprana que trasciende el análisis de costo-beneficio convencional, permitiendo una inversión más equitativa en zonas rurales vulnerables que no poseen alta demanda de tráfico.

Como limitaciones, se reconoce que el modelo dinámico depende de la percepción de expertos y de la configuración de causalidades que pueden variar según políticas futuras. Por ello, las futuras líneas de investigación proponen el uso de Inteligencia Artificial para automatizar la creación de perfiles de proyectos óptimos e integrar infraestructuras de puentes para asegurar la conectividad total de la red rural

Tabla 2 Matriz de interrelación de indicadores de contribución sostenible de caminos rurales. Caso Región Araucanía – Chile

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	I19	I20	I21	I22	I23	I24	I25	I26	I27
I1	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	-0.5	0.25	0.5	0	0.75	0.75	0.5	0	0.75	0.25	0	0.08	0.08	0.5	0	-0.5
I2	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0.92	0.75	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0
I3	0.25	0.25	0	0	-0.75	0.92	0.92	0.92	0.92	0	0	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0	0	0	0.92	0.75	0.92	0.75	-0.5
I4	0.75	0	0	0	-0.25	0	0.08	0	0	0	0	0	0	-0.25	-0.25	-0.08	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0.25	0.5	0
I5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.25	0	0
I6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.92	-0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0.75	0	0
I7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.92	-0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0.25	0	0
I8	0.25	0.75	0	0	-0.25	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
I9	0	0	0	0	-0.5	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0	0
I10	0	0.75	-0.5	0	-0.75	0.25	0.5	0.92	0.92	0	0	0	0	-0.75	-0.75	-0.5	-0.5	-0.5	0	0	0	0	0.75	0.92	0.92	0.5	-0.75
I11	0	0	0	0.08	-0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.75	0.75	0.25	-0.5
I12	0.5	0	-0.75	0	0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0	-0.5	0	0	0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0	0.5	0	-0.25	-0.75	-0.92	-0.75	0
I13	0.25	0	-0.75	0	0.75	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	-0.25	-0.5	-0.5	0	0
I14	0	0	0	0	-0.25	0	0	0	-0.08	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	0.25	0	0	0	0	0	0.75	0.25	0	0
I15	0	0	0	0	-0.08	0	0	-0.08	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0.5	0	0	0	0	0	0.75	0.25	0	0
I16	0.08	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0.5	0	0.92	0.92	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0
I17	0.08	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0
I18	0.08	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0
I19	0	0	0.75	0	0	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.5	0	-0.75	0	0	0	0	0	0	0.25	0.75	0	0.75	0.75	0.92	0.5	0
I20	0	0	0.75	0	0	0.75	0.75	0.75	0.75	0	0.5	0	0	0.92	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0.75	0.5	0.92	0.5	0.5
I21	0	0	0.75	0	0.08	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75	0	-0.5	0.92	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.75	-0.75	-0.5	-0.5
I22	0	0	-0.5	0	0.75	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0	0	0.75	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0.75	0	-0.5	-0.75	-0.75	-0.75	-0.75
I23	0	0	0	0	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	0	0.92	0.75	-0.75	-0.92	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0.5	-0.75	-0.75	-0.75
I24	0	0.5	-0.08	0.5	-0.92	0	0	0	0	0.5	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0.75	-0.5
I25	0	0.75	-0.75	0.5	-0.92	-0.25	-0.25	0	-0.5	0.5	0.75	0.25	0.08	-0.25	-0.25	-0.92	-0.92	-0.92	0	0	0.08	0	0.75	0	0	0.75	-0.75
I26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I27	0	0	0	0	0	-0.25	-0.25	-0.25	-0.25	0	-0.25	0	0.5	-0.5	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.5	-0.5	0.75	0

Camino Rural	Cantidad de Iteraciones (I)											Distancia de Mahattan (normalizada)
	I0	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	
R-791 Lonquimay	0,45	0,37	0,36	0,44	0,56	0,67	0,73	0,69	0,65	0,91	0,91	(Lejos del ideal) 1,00 0,75 0,50 0,25 0,00 (Cerca del ideal)
S-39 Vilcun	0,54	0,56	0,26	0,25	0,31	0,37	0,40	0,41	0,40	0,79	0,79	
R-260 F. Carmen	0,45	0,30	0,37	0,46	0,56	0,65	0,65	0,62	0,52	0,95	0,95	
S-919 C. Carhuello	0,59	0,50	0,46	0,47	0,54	0,59	0,62	0,61	0,61	0,86	0,86	
R-95-S Liucura	0,35	0,36	0,37	0,52	0,66	0,75	0,76	0,74	0,82	0,89	0,89	
R-35 Collipulli	0,70	0,85	0,36	0,24	0,20	0,19	0,17	0,12	0,06	0,06	0,06	
S-65 Ñancul	0,65	0,60	0,65	0,75	0,81	0,83	0,83	0,71	0,83	0,82	0,82	
S-887 Pucón	0,77	0,52	0,51	0,58	0,61	0,64	0,63	0,61	0,74	0,79	0,79	
S-61 Icalma	0,56	0,48	0,43	0,50	0,59	0,64	0,69	0,65	0,65	0,88	0,88	
R-226 Angol	0,65	0,40	0,29	0,34	0,41	0,49	0,53	0,53	0,69	0,80	0,80	
S-592 B. Arana	0,68	0,85	0,79	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,65	0,89	0,89	
S-921 Quelhue	0,56	0,49	0,44	0,50	0,59	0,64	0,69	0,65	0,65	0,89	0,89	
S-61 Allipen	0,64	0,68	0,30	0,28	0,35	0,39	0,38	0,33	0,49	0,86	0,86	
R-825 S. Oscura	0,69	0,69	0,44	0,46	0,50	0,51	0,53	0,48	0,43	0,80	0,80	
S-907 Pichares	0,56	0,23	0,08	0,05	0,07	0,08	0,08	0,09	0,00	0,00	0,00	

Nota: Valores más bajos indican mayor cercanía al punto ideal y, por tanto, mayor contribución al desarrollo sostenible.

Fig. 4 Distancia de Manhattan para caminos optimizados y 10 ciclos temporales de iteración.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

REFERENCIAS

Esta investigación fue financiada por ANID (Fondecyt 11190501). Se agradece la colaboración de la Dirección de Vialidad del MOP y la Gobernación Regional de La Araucanía. Asimismo, se reconoce el soporte metodológico y de equipamiento del grupo GIPTs de la Universidad de La Frontera.

- [1] Pérez, G. (2020). Caminos rurales: vías claves para la producción, la conectividad y el desarrollo territorial. Documento técnico. Boletín 377. CEPAL
- [2] Lupano, J., 2013. La infraestructura de transporte sostenible y su contribución a la igualdad en América Latina y el Caribe. <https://hdl.handle.net/11362/35883>
- [3] Espinet, X., Schweikert, A., & Chinowsky, P. (2017). Robust prioritization framework for transport infrastructure adaptation investments under uncertainty of climate change. ASCE-ASME Journal of Risk and

- Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 3(1), E4015001. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.000085>
- [4] Leal, M. (2016). Informe de evaluación del programa de caminos básicos región de La Araucanía. Ministerio de obras públicas – Dirección de Vialidad.
- [5] Leal, M. (2016). Informe de evaluación del programa de caminos básicos región de La Araucanía. Ministerio de obras públicas – Dirección de Vialidad.
- [6] CGR - Contraloría General de la República de Chile. (2018). Auditoría de los Procesos Para la Conservación de Caminos, Informe Final N° 501 de 03 Diciembre de 2018. Santiago de Chile, Chile. 2018.
- [7] Shen, L.; Lu, W.; Peng, Y.; Jiang, S. Critical Assessment Indicators for Measuring Benefits of Rural Infrastructure Investment in China. *J. Infrastruct. Syst.* 2011, 17, 176–183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000066](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000066)
- [8] Munda, G. (2004). Métodos y procesos multicriterio para la evaluación social de las políticas públicas. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 1, 31–45.
- [9] Vilches, A., & Pérez, D. G. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Iberoamericana de Educación*, 69(1), 39–60. <https://doi.org/10.35362/rie691152>
- [10] Diaz-Sarachaga, J. M., Jato-Espino, D., Alsulami, B., & Castro-Fresno, D. (2016). Evaluation of existing sustainable infrastructure rating systems for their application in developing countries. *Ecological indicators*, 71, 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.033>
- [11] Sierra, L.; Araya, F.; Yepes, V. (2021) Consideración de la incertidumbre y las múltiples disciplinas en la Determinación de Criterios de Sostenibilidad de Caminos Rurales Utilizando Lógica Neutrosófica. *Sustainability* 2021, 13, 9854. <https://doi.org/10.3390/su13179854>
- [12] Zhou, Z.; Alcalá, J.; Yepes, V. Research on Sustainable Development of the Regional Construction Industry Based on Entropy Theory. *Sustainability* 2022, 14, 16645. <https://doi.org/10.3390/su142416645>
- [13] Van Haaster, B., Citroth, A., Fontes, J., Wood, R., & Ramirez, A. (2017). Development of a methodological framework for social life-cycle assessment of novel technologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 423–440. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1162-1>
- [14] Naimanye, A. G., & Whiteing, T. (2016, December). Poverty-centred rural road funds sharing in sub-Saharan Africa. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport* (Vol. 169, No. 6, pp. 387–396). Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/jtran.15.00071>
- [15] Nautiyal, A., & Sharma, S. (2021). Condition Based Maintenance Planning of low volume rural roads using GIS. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127649>
- [16] Vilke, S., Krpan, L., & Milković, M. (2018). Application of the multi-criteria analysis in the process of road route evaluation. *Tehnički vjesnik*, 25(6), 1851–1859. <https://doi.org/10.17559/TV-20170530085451>
- [17] Vanclay, F., Esteves, A. M., Aucamp, I., & Franks, D. (2015). Social Impact Assessment: Guidance for assessing and managing the social impacts of projects.
- [18] Zhang, Q.; Prouty, C.; Koenig, E.S.; Wells, E.C.; Zarger, R.K. Rapid assessment framework for modeling stakeholder involvement in infrastructure development. *Sustain. Cities Soc.* 2014, 29, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.009>
- [19] Sierra, L. A., Yepes, V., & Pellicer, E. (2018). A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures. *Journal of Cleaner Production*, 187, 496–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.022>
- [20] Saeedi, I., Mikaeili Tabrizi, A. R., Bahremand, A., & Salmanmahiny, A. (2022). A soft systems methodology and interpretive structural modeling framework for Green infrastructure development to control runoff in Tehran metropolis. *Natural Resource Modeling*, 35(2), e12339. <https://doi.org/10.1111/nrm.12339>
- [21] Constantinou AC, Fenton N, Neil M. Integrating expert knowledge with data in Bayesian networks: preserving data-driven expectations when the expert variables remain unobserved. *Expert Syst Appl.* 2016
- [22] Xing, K., Ness, D., Lin, F. R. (2013). A service innovation model for synergistic community transformation: Integrated application of systems theory and product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 43, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.052>
- [23] Papageorgiou, K., Singh, P., Papageorgiu, E., Chudasama, H., Bochtis, D., & Stamoulis, G. (2020). Fuzzy Cognitive Map-Based Sustainable Socio-Economic Development Planning for Rural Communities. *Sustainability*, 12, 305. <https://doi.org/10.3390/su12010305>
- [24] Felix, G., Nápoles, G., Falcon, R., Froelich, W., Vanhoof, K., & Bello, R. (2019). A review on methods and software for fuzzy cognitive maps. *Artificial intelligence review*, 52, 1707–1737. <https://doi.org/10.1007/s10462-017-9575-1>
- [25] Gao, L., Zhang, X., Deng, X., Zhang, N., & Lu, Y. (2024). Using fuzzy cognitive maps to explore the dynamic impact on management team resilience in international construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2023-0828>
- [26] Chen, H., Cheng, S., Qin, Y., Xu, W., & Liu, Y. (2024). Sustainability evaluation of urban large-scale infrastructure construction based on dynamic fuzzy cognitive map. *Journal of Cleaner Production*, 449, 141774. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141774>
- [27] Sierra, L. Base de datos de indicadores de sostenibilidad de caminos básicos rurales de la Región de La Araucanía—Chile (2019–2022). Public access database. ResearchGate. Berlin, Germany. Disponible online: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18563.27680> (Acceso al 1 de enero 2026).
- [28] Podvezko, V. (2011). The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. *Engineering Economics*, 22(2), 134–146. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ee.22.2.310>
- [29] Yoo, S., & Harman, M. (2010). Using hybrid algorithm for pareto efficient multi-objective test suite minimisation. *Journal of Systems and Software*, 83(4), 689–701. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2009.11.706>
- [30] Hatzimichailidis, AG, Papakostas, GA y Kaburlasos, VG (2012). Una nueva medida de distancia de conjuntos difusos intuicionistas y su aplicación a problemas de reconocimiento de patrones. *Revista internacional de sistemas inteligentes*, 27 (4), 396–409. <https://doi.org/10.1002/int.21529>
- [31] Maguiña Pérez, R. A. (2010). Sistemas de inferencia basados en Lógica Borrosa: Fundamentos y caso de estudio. *Revista de Investigación de*

- Sistemas e Informática, 7(1), 91-104. Recuperado el 04 de Enero de 2022, de <https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/sistem/article/view/3270>
- [32]Hurtado Moreno, L., Quintero Montoya, O. L., & García Rendón, J. J. (2014). Estimación del precio de oferta de la energía eléctrica en Colombia mediante inteligencia artificial. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 18, 54-87. <https://hdl.handle.net/10419/113876>
- [33]Nasirzadeh, F., Carmichael, D. G., Jarban, M. J., & Rostamnezhad, M. (2019). Hybrid fuzzy-system dynamics approach for quantification of the impacts of construction claims. *Engineering, construction and architectural management*, 26(7), 1261-1276. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2017-0150>
- [34]Stylios, C. D., Georgopoulos, V. C., Malandraki, G. A., & Chouliara, S. (2008). Fuzzy cognitive map architectures for medical decision support systems. *Applied Soft Computing*, 8(3), 1243–1251. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.02.022>
- [35]Dirección de Vialidad- MOP (2017). Caminos Básicos. Instructivo para postulación de caminos básicos intermedios. Obtenido en Agosto 2024. <https://sni.gob.cl/storage/docs/Instructivo-Caminos-Basicos%20Intermedios-2017.pdf>
- [36]Sierra, L. Dynamic and Participatory Sustainability Assessment for Decision-Making on Rural Basic Road Projects; Project 11190501. Funded by Fondecyt INI, ANID; Government of Chile: Santiago, Chile, 2022; Available online: <https://gips10.wixsite.com/ccbb> (Acceso al 5 Febrero de 2026).
- [37]Brundtland, G. H. (1987). Our common future—Call for action. *Environmental conservation*, 14(4), 291-294. <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>