

Propiedades emergentes, resiliencia y seguridad operacional en un sistema sociotécnico ambiental ferroviario (SSTAF)

Emergent properties, resilience and operational safety in a socio-technical and environmental railway system

Gabriel Sosa: Profesor, ingeniero, investigador de la DNISF, JST.

Palabras clave: sistema sociotécnico ambiental ferroviario, interacciones, factores sociales, ambientales y técnico-tecnológicos, transporte, propiedades emergentes, seguridad operacional emergente, rendimiento, resiliencia.

Keywords: socio-technical environmental railway system, interactions, social, environmental, and technological factors, transportation, emergent properties, emergent operational safety, performance, resilience.

Recibido: 13/02/23
Aceptado: 19/03/23

RESUMEN

¿Cómo podemos hacer para ordenar los elementos de un sistema complejo de forma simple, metódica, repetitiva y general?, ¿cómo podemos visualizar las interacciones para ver las propiedades emergentes del sistema de transporte ferroviario?, ¿existe una sola forma de buscar o manejar esas propiedades?

La propuesta de este artículo no busca responsables, causas, factores contribuyentes ni precursores. El análisis se centra, más bien, en las propiedades emergentes deseadas e indeseadas del sistema, que afecten a la seguridad operacional en el transporte.

ABSTRACT

How can we arrange the elements of a complex system in a simple, methodical, repetitive and general way, how can we visualize the interactions to see the emergent properties of the rail transport system, is there only one way to look for or manage these properties?

The proposal of this article does not look for responsible parties, causes, contributing factors, or precursors. Rather, the analysis focuses on desired and undesired emergent properties of the system that affect operational safety in transportation.

Introducción

Este trabajo profundiza en la temática abordada en el artículo “Razonamiento sistémico-matricial en sistemas sociotécnicos complejos aplicado al transporte ferroviario” (Sosa, 2022), publicado en el primer número de la Revista de Seguridad Operacional (RSO) de la JST. Se presenta una nueva perspectiva para modelar de manera integral la investigación y el análisis sistémico de accidentes e incidentes de transporte, con un enfoque específico en el modo ferroviario. Esta propuesta no se limita a la identificación de responsables, causas, factores contribuyentes o precursores; más bien, se enfoca en el análisis de las propiedades emergentes deseables e indeseables del sistema, así como en su resiliencia y rendimiento. En la primera entrega formulamos los siguientes interrogantes: ¿Cómo podemos organizar los elementos de un sistema complejo de manera simple, metódica, repetitiva y general? ¿Cómo podemos visualizar las interacciones para comprender las propiedades emergentes del sistema de transporte ferroviario? ¿Existe una única forma de buscar o gestionar estas propiedades?

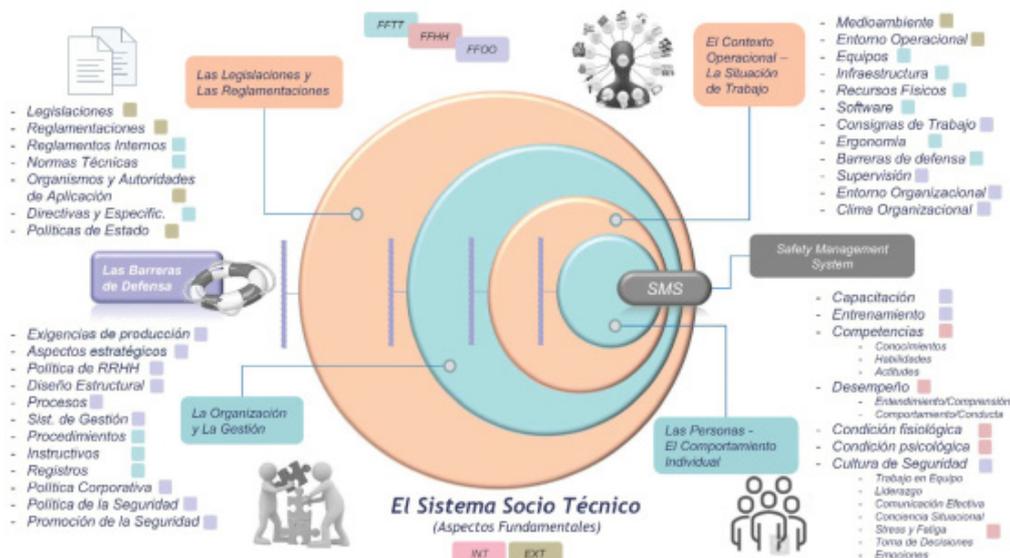
Partiendo del concepto de sistema complejo de Ludwig von Bertalanffy (1976), definido como un conjunto de elementos interactuantes, se introdujo la noción de que la interacción mutua de los distintos elementos de un sistema da lugar a propiedades emergentes, tanto deseables como indeseables (Bunge, 2003). Para operativizar estos conceptos, se desarrolló un procedimiento metódico basado en matrices de acoplamientos posibles (MAP), que facilita la visualización de los elementos, las interacciones y los distintos estados de un sistema sociotécnico ferroviario (SSTF). Se concluyó que, mediante la adecuada definición de las identidades del sistema, es posible analizar accidentes causados tanto por fallos en los componentes como por su interacción. Este análisis se fundamentó en el enfoque de los sistemas de control, introducido en el modelo STAMP de Levenson (2004), así como en el enfoque prevencionista de los peligros, riesgos y barreras de protección propuesto por Reason (1997). En esta segunda entrega, se amplía y complejiza el modelo anterior mediante la incorporación del enfoque resiliente (Hollnagel, Pariès, Woods y Wreathall, 2010), el enfoque prevencionista (Marchitto, 2011) y tomando como referencia el modelo para la gestión de la seguridad operacional ferroviaria de Alejandro Leonetti, referente en la materia en Argentina. A diferencia del esquema presentado en el primer artículo (Sosa, 2022), este trabajo incorpora el factor ambiental como parte del compromiso con las próximas generaciones, en línea con el objetivo de la Ley Yolanda 27.592 de 2020, y amplía su campo de acción en la investigación y análisis de sucesos de transporte.

Modelos de gestión de sistemas sociotécnicos

Existen distintos modelos de gestión para la seguridad operacional que podemos utilizar para entender cómo desarrollan las empresas esta actividad. A continuación, se expone un modelo que, desde la perspectiva ferroviaria, define a los “sistemas sociotécnicos” de la siguiente manera: concepto aplicado a una organización que plantea, en el marco de la misma, la conjunción de un sistema técnico y un sistema social que interactúan con un objetivo común (Leonetti, s.f.).

La idea surge del Instituto de Relaciones Humanas de Tavistock, Inglaterra, en los años 50, de la mano de Eric Trist y Ken Bramfort, quienes plantearon la existencia de un sistema técnico (recursos físicos, equipos, herramientas, el entorno y el medioambiente) y de un sistema social (las personas que componen la organización) que resultan ser inseparables. Este enfoque aplica la naturaleza mixta de las relaciones de transformación de valor, conformadas por los factores técnicos y por la actuación de las personas en los roles asignados dentro de la organización. Cuando existe interacción del proceso operativo con otras organizaciones o con la comunidad, decimos que el sistema sociotécnico es abierto (Ludwig Von Bertalanffy, 1976). En la Figura 1 se ilustran los aspectos fundamentales de un modelo de sistema sociotécnico abierto: las personas y el comportamiento individual, el contexto operacional, la organización y la gestión, las legislaciones y reglamentaciones y las barreras de defensa.

Figura 1. Aspectos fundamentales de un sistema sociotécnico



Fuente: material de cátedra de Leonetti (s/f).

Este modelo se encuentra plasmado en la Resolución N.º 170/2018 del Ministerio de Transporte de Argentina, la cual establece como objetivo para el transporte ferroviario de pasajeros y cargas la creación de un Sistema Nacional de Gestión de la Seguridad Operacional.

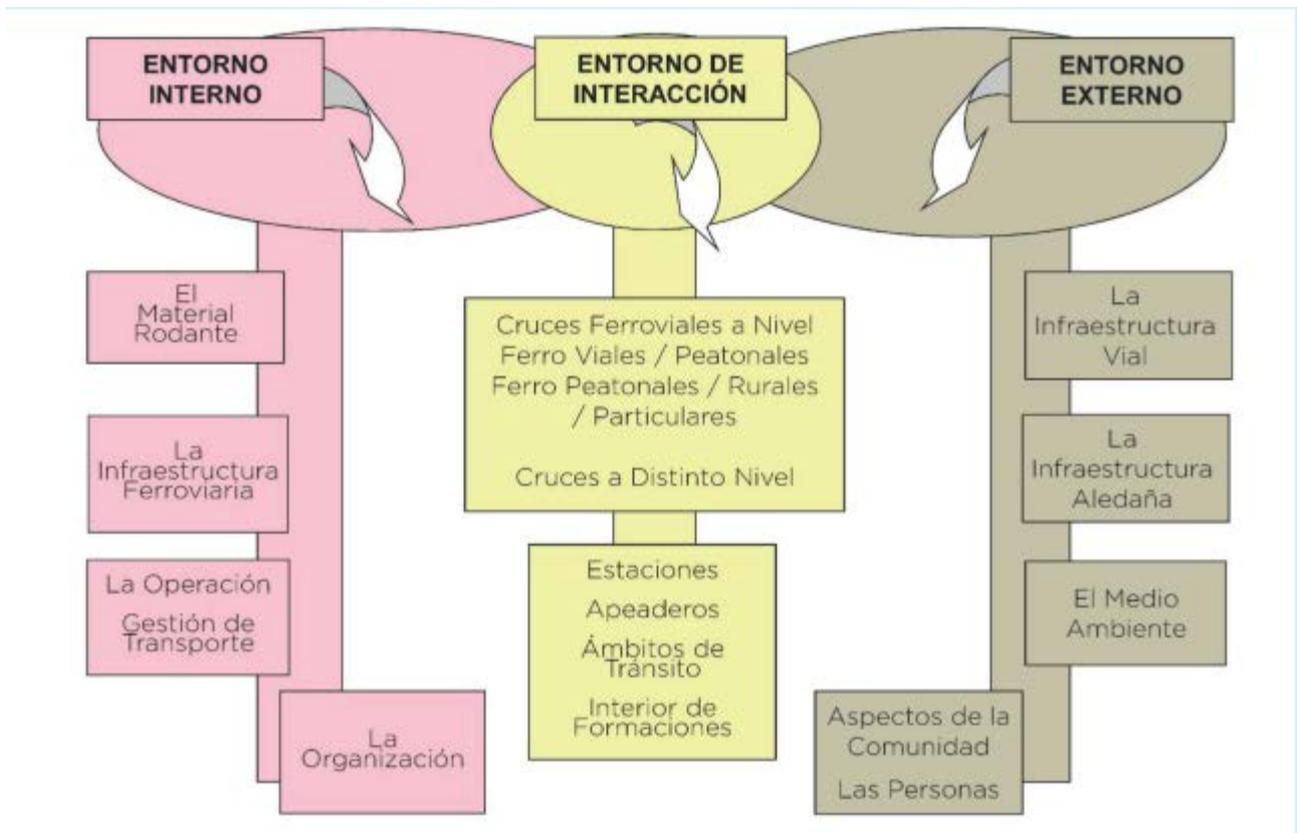
Dentro del modelo de la Figura 1, el “contexto operacional” se refiere a todas las circunstancias o condiciones del entorno (incluyendo el proceso operativo, las condiciones del medio y del ambiente, los parámetros específicos de la operación, políticas operativas, condiciones de mantenimiento, factores organizacionales, regulaciones, aspectos sociopolíticos y económicos, entre otros) en las cuales se espera que se desarrolle un determinado proceso operativo. Este contexto incluye todos los recursos necesarios para la ejecución del proceso y sus interfaces de interrelación con los sistemas circundantes (Leonetti, s.f.).

En el “contexto operacional” se pueden identificar tres entornos principales:

1. Entorno interno: se refiere al ambiente dentro de las fronteras físicas de la organización, considerando las limitaciones y condiciones que contiene el proceso operativo en sí mismo.
2. Entorno externo: abarca todas las condiciones y elementos que rodean la actividad desarrollada, incluyendo aspectos del medio ambiente, condiciones sociales, políticas y económicas externas a la organización.
3. Entorno de interacción: engloba las áreas donde la comunidad interactúa directamente con la actividad en cuestión.

Como se ilustra en la Figura 2, también se pueden reconocer distintos factores dentro de los tres entornos mencionados.

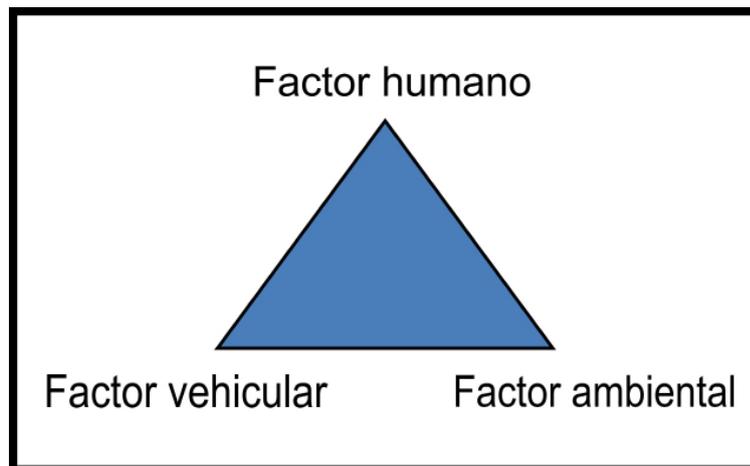
Figura 2. Esquema del contexto operacional



Fuente: material de cátedra de Leonetti (s/f).

Al igual que el modelo de gestión de seguridad operacional ferroviaria, existen otros enfoques para el análisis de sucesos, como el basado en la trilogía o tetralogía accidentalógica aplicado al modo automotor.

Figura 3. Trilogía accidentalológica del modo automotor



Fuente: Borrell Vives et al, 2000.

En la trilogía accidentalológica, los factores de riesgo implicados son el medio ambiente, el factor vehicular y el factor humano. Estos elementos son cruciales para la comprensión y prevención de accidentes viales. Por otro lado, en la tetralogía accidentalológica, se incorpora un cuarto factor, que suele ser la gestión institucional o el entorno. Ambos enfoques se utilizan para analizar los accidentes desde distintas perspectivas, considerando una gama más amplia de elementos que influyen en la accidentalidad (Borrell Vives et al., 2000). A continuación, se describen brevemente los factores y las causas según el enfoque de la trilogía o tetralogía accidentalológica:

- Factor humano: en seguridad vial, el factor humano se refiere a cómo conductores y peatones influyen en la seguridad en la circulación. Se destaca que las diferencias individuales, como sexo y edad, pueden afectar los tiempos de reacción ante situaciones de riesgo. Por ejemplo, un conductor joven puede tener tiempos de reacción más rápidos que uno mayor. Además, se menciona el tiempo psicofísico de reacción, que es el tiempo desde que una persona percibe un peligro hasta que reacciona ante él. Este tiempo puede variar según factores como la salud física y mental, el consumo de alcohol y la fatiga.
- Factor de la vía: se refiere a cómo las características de la calzada y su entorno influyen en la seguridad vial. Por ejemplo, una ruta con curvas cerradas y poco visibles puede aumentar el riesgo de accidentes. Condiciones como el estado de conservación de la calzada, el diseño de las curvas y la presencia de señales de tránsito también pueden afectar la seguridad de los conductores.
- Factor ambiental: se refiere a cómo las condiciones climáticas afectan la seguridad vial. Por ejemplo, la lluvia puede reducir la visibilidad y hacer que las calzadas estén resbaladizas, aumentando el riesgo de accidentes. Otros factores ambientales, como la nieve, el hielo, la niebla y la luminosidad, también pueden influir en la seguridad vial.
- Factor vehicular: se refiere a cómo las características técnicas de los vehículos pueden influir en la seguridad vial. Por ejemplo, un vehículo con un sistema de frenado deficiente puede tener un mayor riesgo de estar involucrado en un accidente.

Según este enfoque, la causa de un siniestro es el resultado final de un proceso en el que se combinan diversos eventos, condiciones y conductas. Los factores que desencadenan un suceso surgen de las interacciones entre el conductor, el vehículo y la vía en ciertas condiciones ambientales. Para comprender estos factores de riesgo, se definen términos básicos como grado de peligrosidad, fuente del riesgo, factor de riesgo, entre otros (Bustos, 2012).

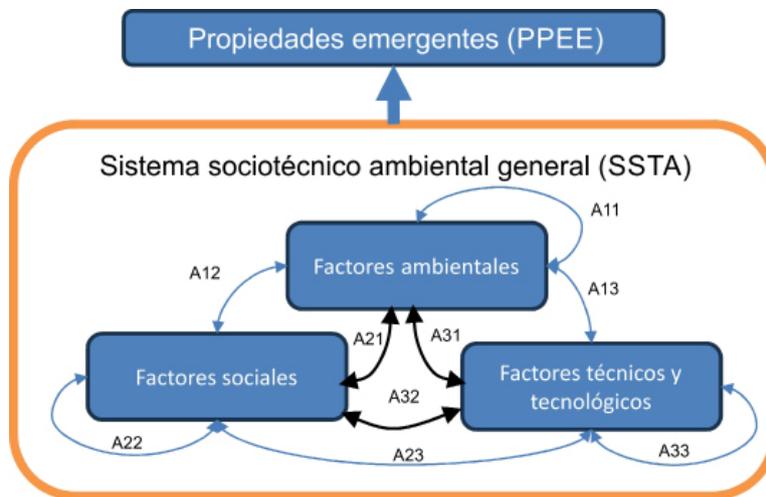
Como se puede observar, en el enfoque anterior se buscan las causas de un siniestro, no obstante, en este artículo se desarrolla una propuesta metodológica que toma los aportes de diversos modelos de gestión de seguridad operacional sin atribuir responsabilidades, identificar causas, factores contribuyentes o precursores. Más bien, el análisis se enfoca en las propiedades emergentes deseadas e indeseadas del sistema que afectan la seguridad operacional en el transporte.

El objetivo es proponer un esquema general para investigar accidentes e incidentes que abarque tanto el modelo de gestión de seguridad operacional existente en el ámbito ferroviario, como aquellos modelos de investigación accidentológica de otros modos de transporte que interactúan con el ferrocarril. En esta línea, tanto el transporte ferroviario como los otros modos que interactúan en el accidente o incidente bajo análisis son considerados propiedades emergentes deseables, resultantes de complejas interacciones multidimensionales entre los factores sociales (las personas, su organización y su cultura), los factores técnicos-tecnológicos (las herramientas, las técnicas, etc.) y el ambiente (la naturaleza, la ley física, ciclos estacionales, etc.).

Modelo general de investigación de accidentes e incidentes de un sistema sociotécnico ambiental (SSTA)

Dentro de nuestra propuesta se identifican tres grupos fundamentales de factores: sociales, técnicos-tecnológicos y ambientales. En la Figura 4, las flechas simbolizan la combinación o acoplamiento de estos factores, que generarían, a su vez, las interacciones o propiedades emergentes del sistema bajo análisis donde ocurrió un suceso.

Figura 4. Modelo general de gestión de un sistema sociotécnico ambiental (SSTA)



Fuente: elaboración propia

En la Figura 5 se puede observar una Matriz de Acoplamientos Posibles (MAP), donde las propiedades emergentes (PPEE) están representadas por los acoplamientos "Aij".

Figura 5. Matriz de Acoplamientos Posibles (MAP) del modelo SSTA

Propiedades emergentes PPEE	Factores Ambientales FFAA	Factores Sociales FFSS	Factores Técnicos - Tecnológicos FTT
Factores Ambientales FFAA	A11	A12	A13
Factores Sociales FFSS	A21	A22	A23
Factores Técnicos - Tecnológicos FTT	A31	A32	A33

Fuente: elaboración propia¹

1. Por conveniencia gráfica, la matriz es cuadrada, pero también podría ser cúbica, permitiendo acoplamientos triples que serían visibles en un entorno gráfico tridimensional (3D).

Definición de la triada de factores

A continuación, se explican de manera axiomática cada uno de los factores. Estas definiciones se basan en el sentido común que prevalece en distintos modelos como el de gestión de la seguridad operacional ilustrado en la Figura 1 o la trilogía accidentalológica de la Figura 3.

Factores ambientales (FFAA)

Son elementos de la naturaleza que interactúan o se relacionan entre sí, dando lugar a la aparición de distintas propiedades emergentes (PPEE), como ser:

- Propiedades climáticas y físicas: incluyen la temperatura, la humedad, el nivel de precipitaciones y la velocidad del viento de una región.
- Propiedades geográficas-topológicas: se refieren a la geografía física y topografía del terreno, como la presencia de montañas, ríos y valles.
- Propiedades estacionales: abarcan los ciclos naturales que afectan las actividades agrícolas y ganaderas, como las temporadas de cosecha.
- Propiedades ecológicas: relacionadas con la biodiversidad y los ecosistemas, incluyendo la presencia de especies protegidas y áreas de conservación.

Factores sociales (FFSS)

Se vinculan a los elementos humanos y organizacionales que interactúan para dar lugar a diversas PPEE. Estas pueden ser:

- Propiedades organizacionales:
 - Estructura organizativa: la jerarquía y distribución de roles dentro de la organización, que facilita la toma de decisiones y la ejecución de operaciones.
 - Cultura corporativa: los valores y normas compartidos que influyen en el comportamiento y las interacciones del personal, afectando la moral y la productividad.
 - Habilidades y competencias del personal: la capacitación y experiencia que posee el personal, esencial para el mantenimiento y la operación segura del sistema ferroviario.
 - Políticas de Recursos Humanos: estrategias para la gestión del personal, incluyendo reclutamiento, capacitación, evaluación y desarrollo profesional.
 - Normas y regulaciones internas: directrices que rigen las operaciones diarias, asegurando la seguridad, eficiencia y cumplimiento regulatorio.
- Contexto social:
 - Características de los usuarios: diversidad en las necesidades y expectativas, incluyendo accesibilidad para personas con discapacidades.
 - Políticas públicas de transporte: decisiones gubernamentales que afectan la planificación, operación y financiamiento del SSTAF.
 - Condiciones económicas: factores económicos que impactan la demanda de servicios ferroviarios y la asignación de recursos para su operación y mantenimiento.
 - Necesidades y expectativas de diferentes grupos de usuarios: esto incluye la consideración de servicios inclusivos para personas con diversas necesidades.

- Gremios ferroviarios: su influencia en las condiciones laborales, políticas laborales y operaciones del sistema.
- Interacción con otros modos de transporte: la forma en que el SSTA se integra y coordina con otros modos, especialmente en puntos de acceso compartido como son los pasos a nivel (PAN), para una movilidad eficiente y segura.

Factores técnicos-tecnológicos (FETT)

Este tipo de factores en el sistema ferroviario no solo contribuye de forma individual a su funcionamiento, sino que también su interacción genera propiedades emergentes cruciales para la construcción, operación y mantenimiento del sistema. Estas PPEE incluyen:

- Propiedades de la vía: resultan de la interacción entre rieles, fijaciones y durmientes, creando una infraestructura que soporta eficientemente el tráfico ferroviario bajo diversas condiciones ambientales y de carga. La resiliencia y estabilidad de la vía son ejemplos de propiedades emergentes que aseguran la seguridad y continuidad de las operaciones.
- Capacidad de señalización y comunicación: surge de la integración de tecnologías de señalización y sistemas de comunicación, permitiendo una gestión de tráfico precisa y segura. Esta propiedad emergente facilita la coordinación entre trenes y controladores, optimizando el flujo de trenes y minimizando los riesgos de colisión.
- Eficiencia en la gestión de trenes: la combinación de sistemas de gestión de trenes y tecnologías de seguimiento da lugar a una operación optimizada, donde la programación, despacho y seguimiento de trenes se realizan con máxima eficiencia, mejorando la puntualidad y capacidad de la red.
- Sostenibilidad del mantenimiento: la aplicación de técnicas avanzadas de mantenimiento y diagnóstico predictivo en equipos y material rodante conduce a una mayor disponibilidad y vida útil de los activos ferroviarios, reduciendo las interrupciones del servicio y los costos operativos.
- Integración de la información: la interacción entre sistemas de gestión de información y tecnologías operativas genera una red de datos integrada que soporta la toma de decisiones en tiempo real, mejora la respuesta a incidentes y facilita la planificación estratégica.

Propiedades emergentes (PPEE)

Las diversas interacciones entre los tres tipos de factores desarrollados previamente dan lugar a la emergencia del SSTA y a los demás modos que interactúen en el suceso.

Según Mario Bunge (2003), se dice que la propiedad de un objeto complejo es emergente si ninguno de los constituyentes o precursores del objeto la posee. A continuación, se propone un procedimiento general para determinar las PPEE de un SSTA, de acuerdo a la definición citada.

1. En primer lugar, se deben identificar los factores FFAA, FFSS y FETT relevantes del sistema bajo análisis, los cuales pueden variar según el contexto específico.
2. En segundo lugar, se deben analizar las interacciones entre los diferentes factores y subfactores, así como la influencia entre ellos.
3. En tercer lugar, se deben registrar aquellas propiedades emergentes del sistema ferroviario y de los demás modos de transporte interactuantes que resulten de las combinaciones entre los factores.
4. Finalmente, se deben validar las propiedades emergentes (PPEE) identificadas. Este proceso puede implicar la revisión de literatura, consultas con expertos y análisis pormenorizados, entre otras acciones.

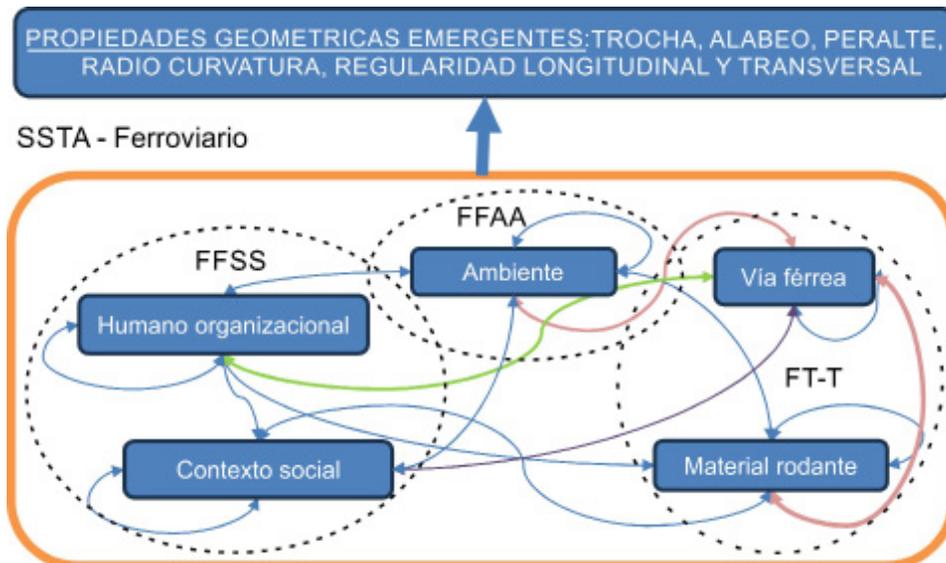
El objetivo principal es asegurarse de que las propiedades identificadas sean genuinamente "emergentes", de acuerdo con la definición de Bunge, y no simplemente propiedades asociadas a los factores individuales.

En el siguiente apartado se desarrolla un ejemplo de una PPEE resultante de la interacción entre los tres tipos de factores citados y sus respectivos subfactores.

El ejemplo de la “trocha” como propiedad emergente de un SSTA

En la Figura 6 se puede observar cómo la interacción entre los factores FFAA, FFFT y FFSS da lugar a ciertas propiedades geométricas, como la trocha, el peralte, el radio de curvatura, entre otras.

Figura 6. Modelo de SSTA y propiedades geométricas emergentes



Fuente: elaboración propia.

Para ilustrar nuestro ejemplo, nos centraremos en la propiedad emergente “trocha” (ver Figura 7), que se define como la distancia entre las caras internas de las cabezas de los rieles que conforman la vía, medida 14 mm por debajo del plano de rodadura en alineación recta.

Figura 7. Croquis de una trocha de vía



Fuente: Vías férreas

En la Figura 8 se presenta una matriz de acoplamientos posibles (MAP) de propiedades emergentes (PPEE), es decir, una matriz de propiedades emergentes (MPPEE)², construida sobre la base de ejemplos de interacciones de diferentes subfactores del modelo SSTA presentado en la Figura 4. Es importante mencionar que la matriz es bi-

² Si consideramos su aplicación en investigaciones de accidentes, la MEP podría desarrollarse utilizando la herramienta Excel o bien mediante el uso de inteligencia artificial.

Figura 8. Matriz de Propiedades Emergentes (MPPEE) del SSTAF

Trocha emergente		FFAA	FFSS		FFTT				
		Ambiente	Contexto social	Humano Org.	Material rodante	Riel derecho	Riel izquierdo	Fijaciones D y I	Durmientes y balasto
FFAA	Ambiente	Condiciones geográficas y climáticas	Influencia Ambiental-Organizacional	Adaptación Organizacional	Expansión - Contracción - Esfuerzos mecánicos. Erosión, Corrosión, Desgaste, Descomposición. Contaminación, Calidad del aire, Aludes, etc.,				
FFSS	Contexto social	Comportamientos y actitudes sociales	Cultura normativa	Interacción Social-Organizacional	Expectativas del servicio	Presión Comunitaria, Desarrollo Urbano, Situación económica, Vandalismo, Etc.			
	Humano Org.	Respuesta Organizacional al Ambiente	Normativas Operativas y Socio-Organizacionales	Estructura organizacional	Fatiga operacional	Operación y Mantenimiento	Protocolos de Fijación	Protocolo de Inspección	Gestión de Durmientes
FFTT	Material rodante	Tracción y frenado	Accidente o incidente	Protocolos de uso.	Propiedades del material rodante	Cargas dinámicas	Cargas dinámicas	Accidente o incidente	Accidente o incidente
	Riel derecho	Concentración térmica	PAN	Protocolos de mantenimiento	Fuerzas de reacción	Resiliencia Mecánica	Trocha	Cohesión con Fijaciones D	Estabilidad con el durmiente
	Riel izquierdo			Protocolos de mantenimiento	Fuerzas de reacción	Trocha	Resiliencia Mecánica	Cohesión con Fijaciones I	Estabilidad con durmientes
	Fijaciones D y I	Impacto Ambiental de las Fijaciones		Protocolos de Mantenimiento de Durmientes	Accidente o incidente	Fuerzas de reacción	Fuerzas de reacción	Propiedades de las Fijaciones	Fuerza de sujeción
	Durmientes y balasto	Impacto Ambiental de los Durmientes		Protocolos de Mantenimiento de Durmientes	Accidente o incidente	Fuerzas de reacción	Fuerzas de reacción	Fuerzas de reacción	Propiedades de Durmientes y Balasto
Referencia: en verde, los riesgos aceptables; en amarillo, los riesgos poco aceptables; y en rojo, los riesgos inaceptables. En celeste se identifican las identidades del sistema que resultan de la interacción de los mismos factores entre sí. Las casillas sin color están sin análisis.									

Fuente: elaboración propia.

dimensional por razones de claridad visual, pero podría ser tridimensional para representar acoplamiento triples. En casos donde los acoplamientos no puedan visualizarse, se recurriría a un análisis multidimensional.

La MPPEE de la Figura 8 representa un caso hipotético de investigación accidentológica, en donde no solo se busca medir la trocha para obtener un valor geométrico, sino que se pretenden analizar todas las interacciones de los subfactores intervinientes del SSTAF bajo análisis, para poder identificar distintos tipos de riesgos.

Luego de elaborar la matriz, el investigador debe analizarla. En dicha instancia se encontrará con propiedades resultantes de las interacciones de los subfactores de un SSTAF particular. A modo de ejemplo, definimos algunas de las PPEE de la matriz:

- Trocha (verde): la trocha emerge como una propiedad geométrica de la interacción entre el riel izquierdo y el riel derecho, pero también depende de la interacción con las fijaciones, los durmientes, el balasto; los protocolos de inspección y mantenimiento y demás factores. La distancia entre los rieles es esencial para la estabilidad y la operación del material rodante.
- PAN (amarillo): en este ejemplo, el paso a nivel (PAN) surge del acoplamiento bidimensional de la vía con el contexto social, aunque en la práctica podría ser multidimensional. Esta propiedad emergente, al igual que muchas de las ejemplificadas en la matriz, merece un análisis más detallado. De manera sucinta, la abordaremos con la misma lógica que hemos seguido hasta ahora. Consideraremos al contexto social como una propiedad emergente del acoplamiento multidimensional entre factores sociales, factores técnicos-tecnológicos y factores ambientales. Por lo tanto, al analizar un suceso en un PAN, no solo nos centraremos en aspectos inherentes a los factores intervinientes, como la organización interna de la operadora ferroviaria, el comportamiento técnico de los operarios en horario laboral, las normativas influyentes, la temperatura, la visibilidad, la velocidad del viento, etc., sino que también examinaremos los factores del contexto social emergente³. Por ejemplo, si se trata de una colisión en un PAN rural con un camión de cargas vitivinícola, podemos analizar el factor ambiental del contexto social desde el punto de vista estacional interactuando con el factor social en su dimensión socioeconómica.

3. Es importante considerar dentro de los factores del contexto social emergente a los diversos actores del transporte público, que pueden incluir técnicos, políticos, económicos, académicos, científicos o miembros de la comunidad que están fuera del ámbito ferroviario. Es crucial adoptar una perspectiva diferente al analizar estos actores, ya que si se examina el contexto social con la misma óptica que se utiliza para la gestión y operación del ferrocarril, el PAN no sería una propiedad emergente, sino más bien una propiedad inherente del sistema ferroviario.

- Esto podría relacionarse con la temporada de cosecha de uva, donde el flujo vehicular promedio anual en el PAN es bajo, pero durante la temporada de cosecha aumenta por encima de los umbrales normalizados para determinar la instalación de barreras automáticas. Quizás una recomendación de seguridad, además del cumplimiento de la SETOP⁴, sea coordinar a los actores del contexto social y a la operadora ferroviaria a cargo de la vía para establecer un calendario de otro tipo de recubrimiento temporal en el PAN durante la temporada de cosecha.
- Adaptación organizacional (blanco): esta propiedad emerge de la interacción del factor ambiental general y un subfactor social, como el humano organizacional.
- Desgaste ambiental del material (amarillo): emerge de la interacción del factor ambiental con distintos subfactores, como material rodante, riel izquierdo y derecho, fijaciones, durmientes.
- Cultura normativa (celeste): esta propiedad emergente resulta de la interacción entre factores sociales, y se materializa, por ejemplo, en regulaciones sociales relacionadas con el sistema ferroviario.
- Resiliencia mecánica (celeste): esta propiedad emerge de la interacción de los subfactores riel derecho y riel izquierdo y representa la capacidad del riel para resistir y recuperarse de esfuerzos y tensiones mecánicas.
- El accidente/incidente (rojo) sería una propiedad emergente no deseada de la interacción de los subfactores material rodante y durmientes/balasto, combinaciones para las cuales el sistema no fue diseñado. Esto puede resultar en daños al material rodante, infraestructura o lesiones a personas. Su detección durante un relevamiento indica un descarrilamiento, por lo tanto, es crucial evitarlo, gestionando los riesgos asociados que surgen de este tipo de interacciones.

Propiedades emergentes (PPEE) y peligros asociados a factores generales

Figura 9. Matriz de propiedades emergentes (MPPEE) del SSTAF y peligros asociados

Propiedades Emergentes (PPEE) y peligros (P)	Factores Ambientales (FFAA)	Factores Sociales (FFSS)	Factores Técnico-tecnológicos (FFTT)
FFAA	PPEE: microclima P: cambios extremos de temperatura	PPEE: impacto ambiental en la operación P: impacto de las operaciones en la comunidad local	PPEE: vías resilientes P: Erosión
FFSS	PPEE: estaciones resilientes P: impactos del cambio climático	PPEE: cultura organizacional P: falta de capacitación	PPEE: accesibilidad P: barreras arquitectónicas
FFTT	PPEE: tecnología para la resiliencia P: fallos técnicos en condiciones extremas	PPEE: tecnología para la inclusión P: falta de tecnología de asistencia	PPEE: eficiencia operativa P: obsolescencia de equipos

Fuente: elaboración propia

4. Resolución N.º 7 de 1981 de la Secretaría de Estado de Transporte y Obras Públicas de Argentina, conocidas como normas SETOP para los cruces entre caminos y vías férreas. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/setop_7-81.pdf

En la Figura 9 se presenta una MPPEE hipotética, en un nivel más generalizado que la matriz de la Figura 8, con ejemplos de posibles peligros asociados (P).

A continuación, describimos las propiedades emergentes (PPEE) identificadas junto con algunos peligros asociados:

- **Microclima:** esta propiedad resulta de la interacción entre factores ambientales en una región determinada. Puede surgir de la combinación de diferentes subfactores, como la topografía, el tipo de suelo, la vegetación, la reflexión del calor, etc., y dar lugar, por ejemplo, a la emergencia de temperaturas extremas en un tramo de vía plena.
- **Cultura organizacional:** surge de la interacción de diferentes factores sociales, como las políticas de Recursos Humanos, la estructura organizativa y las normas internas del sistema ferroviario bajo análisis. Un peligro que puede asociarse a esta PPEE es la falta de capacitación continua.
- **Eficiencia operativa:** esta propiedad puede surgir de la interacción de diferentes factores tecnológicos y técnicos, como la tecnología de señalización, de gestión de trenes y de mantenimiento. Por ejemplo, la implementación de un sistema de gestión basado en registradores de evento y GPS puede mejorar la eficiencia operativa del sistema, al permitir un seguimiento más preciso de la circulación de los trenes. Un peligro asociado a esta PPEE podría ser la obsolescencia de maquinarias o equipos.
- **Estaciones resilientes:** estas PPEE surgen de la interacción entre los factores sociales y ambientales. Peligros asociados a esta propiedad, podrían ser, por ejemplo, inundaciones imprevistas. Por ello, en una región propensa a inundaciones, la estación de tren podría diseñarse con características de resiliencia, con plataformas elevadas y sistemas de drenaje eficientes.
- **Accesibilidad:** esta propiedad surge de la interacción entre los factores sociales y técnicos-tecnológicos. Un peligro asociado podría ser la presencia de barreras arquitectónicas que impidan la inclusión de personas con movilidad reducida. En este caso, la demanda de accesibilidad se podría abordar mediante la implementación de tecnología de asistencia, la instalación de rampas, la señalización en Braille, entre otras medidas.
- **Vías resilientes:** el diseño de vías resilientes puede surgir de la interacción entre los factores ambientales y los técnicos-tecnológicos. Un peligro asociado de la interacción de estos factores, podría ser, por ejemplo, la erosión de la vía por estrés dinámico. Ahora bien, al detectarse dicho peligro en una región con suelos inestables, las vías del tren podrían diseñarse con características de resiliencia, como cimientos reforzados y materiales de construcción duraderos.
- **Impacto ambiental en la operación:** esta propiedad puede surgir de la interacción entre los factores ambientales y sociales. Por ejemplo, en una región con altos niveles de contaminación del aire, la operación del tren puede verse afectada por regulaciones ambientales estrictas que comprometen su funcionamiento.
- **Tecnología para la inclusión:** puede surgir, por ejemplo, de la interacción entre factores técnicos-tecnológicos y sociales, en respuesta a una demanda particular. Por ejemplo, la tecnología de señalización en Braille en estaciones, que podría mejorar la inclusión de los usuarios con discapacidades.
- **Tecnología para la resiliencia:** esta PPEE puede surgir de la interacción entre los factores técnicos-tecnológicos y ambientales. Por ejemplo, la implementación de tecnología de monitoreo de condiciones, como sensores de humedad y temperatura, puede mejorar la resiliencia del sistema ferroviario en condiciones ambientales adversas.

Peligros asociados a las PPEE

Desde un enfoque prevencionista, el peligro se define como una situación caracterizada por la posibilidad presente de causar daño a bienes y/o lesiones a personas. También puede describirse como la probabilidad actual de que una situación resulte en daño.

Se considera un peligro real cuando tiene la capacidad de causar daño de inmediato. En cambio, un peligro potencial se relaciona con una situación oculta que se manifiesta cuando se dan las condiciones necesarias (condición latente o peligro latente).

Para el prevenciónismo, los peligros generan riesgos que deben mantenerse en niveles aceptables. Desde el enfoque clásico de la seguridad operacional, los peligros se consideran como generadores de propiedades emergentes no deseadas que deben evitarse. Los sistemas se diseñan para ser robustos frente a estos peligros, utilizando estrategias como la redundancia y la mitigación de riesgos.

Los peligros se perciben como resultados de condiciones inseguras, fallos, errores o mal funcionamiento. La seguridad se alcanza, precisamente, evitando la ocurrencia de eventos (Hollnagel, 2009).

Con la introducción del enfoque de la resiliencia, adoptamos una perspectiva diferente sobre los peligros. En lugar de centrarnos exclusivamente en prevenirlos, procuramos comprender cómo los sistemas pueden adaptarse y recuperarse de los peligros presentes.

Para complementar lo dicho previamente, proponemos el término “resiliencia operativa”, que se entiende como la capacidad del sistema para ajustarse a su entorno cambiante y para mantener o mejorar su rendimiento. Si los peligros se consideran parte integral del contexto operativo del sistema, la resiliencia operativa se lograría mediante la adaptabilidad y la capacidad de recuperación.

Habilidades de un sistema resiliente

Según Hollnagel (2010), se pueden identificar cuatro habilidades necesarias para que un sistema sea resiliente en términos operativos:

1. Responder: saber qué hacer, es decir, cómo responder a las perturbaciones y variabilidades regulares e irregulares, ya sea implementando un conjunto preparado de respuestas o ajustando el funcionamiento normal. Esto se traduce en la capacidad de abordar lo actual.
2. Monitorear: saber qué buscar, es decir, cómo monitorear lo que está cambiando o puede cambiar en el corto plazo, lo cual requerirá una respuesta. El monitoreo debe cubrir tanto el funcionamiento del propio sistema como los cambios en el entorno. Esto se traduce en la capacidad de abordar lo crítico.
3. Anticipar: saber qué esperar, es decir, cómo anticipar propiedades emergentes, amenazas y oportunidades en el futuro, así como posibles interrupciones o cambios en las condiciones operativas. Esto se traduce en la capacidad de abordar lo potencial.
4. Aprender: saber qué ha sucedido, es decir, cómo aprender de la experiencia, cómo encarar las lecciones aprendidas, tanto de los éxitos como de los fracasos. Esto se traduce en la capacidad de abordar lo factual.

La seguridad operacional como una propiedad emergente

Según el enfoque prevenciónista, cada componente del sistema sociotécnico ambiental ferroviario (SSTAF) posee sus propios peligros y riesgos asociados. La gestión efectiva de estos en cada factor contribuye al estado general de la seguridad operacional del sistema.

En este sentido, la seguridad operacional podría considerarse como una propiedad inherente de cada factor, en lugar de una propiedad emergente del sistema en su conjunto, según la definición de Bunge (2003).

Para ampliar el debate sobre modelos de análisis de accidentes de transporte, proponemos repensar el concepto de seguridad operacional, trascendiendo el enfoque prevenciónista de Reason (1997) y absorbiendo conceptos como el de propiedades emergentes y matrices de acoplamientos posibles presentados en este artículo y en la entrega anterior.

Asimismo, proponemos un nuevo concepto, el de “seguridad operacional emergente”, definido como el estado dinámico y adaptativo de un sistema, en el cual las interacciones entre sus componentes, subfactores y las propiedades emergentes resultantes de estas interacciones se gestionan de manera continua y adaptativa para mantener los riesgos de lesiones a personas o daños a bienes en un nivel aceptable o por debajo del mismo, así como también para mantener un rendimiento operativo aceptable frente a las propiedades emergentes no deseadas.

Este estado se lograría mediante la identificación y gestión de los peligros y riesgos inherentes del sistema, así como también de los peligros asociados a las propiedades emergentes de las interacciones entre los componentes y subfactores del sistema. Esto se puede lograr con el uso de las matrices de acoplamientos posibles (MAP).

La seguridad operacional emergente (SOE) no debe entenderse como un estado fijo o estático, sino más bien como un estado en constante cambio y evolución, que adquiere distintas dinámicas en respuesta a las variaciones en el sistema y en su entorno. Por ejemplo, las condiciones climáticas, el estado de la infraestructura, el comportamiento humano, entre otros factores; pueden cambiar de un momento a otro, afectando la seguridad operacional emergente. Un sistema que contemple la SOE podría adaptarse a estos cambios de manera efectiva, para mantener un nivel de seguridad y rendimiento adecuado. Esto implica la capacidad de detectar cambios, evaluar su impacto en la seguridad operacional y tomar medidas para adaptarse a ellos de manera oportuna. Desde la investigación de sucesos se podrían elaborar recomendaciones de seguridad en esa línea conceptual.

Reflexiones

Dentro de la propuesta metodológica y conceptual desarrollada en este artículo, se reconoce que el transporte ferroviario y los demás modos interactuantes son propiedades emergentes deseadas, de alto impacto, resultantes de los acoplamientos, complejos y multidimensionales, de los factores del sistema sociotécnico ambiental ferroviario (SSTAF).

Entre las distintas propiedades deseadas, la seguridad operacional emergente (SOE) no se establece como una propiedad estática y aditiva de los componentes individuales del sistema, sino que surge de las interacciones entre los componentes y los subfactores. Al utilizar matrices de acoplamientos posibles (MAP), se pueden visualizar, anticipar y gestionar los riesgos asociados a estas propiedades.

En el ejemplo de la Matriz de Propiedades Emergentes (MPPEE) del SSTAF (Figura 8), donde la "trocha" se considera como la propiedad fundamental y se acopla de a pares a los factores, se puede observar que la aparición de un accidente o incidente es intrínseca al sistema presentado de forma hipotética. Por lo tanto, una recomendación de seguridad operacional emergente (SOE) para fortalecer la resiliencia operativa sería aumentar la cantidad de propiedades emergentes (PPEE) deseadas con alto impacto en la operación, donde podamos gestionar sus peligros asociados de manera eficiente para que el rendimiento sea lo más elevado posible. Administrar el cociente entre la ocurrencia de PPEE deseadas y su impacto sobre la ocurrencia de PPEE no deseadas, tendiendo al mayor valor posible, puede servir como enfoque complementario al prevencionista. Una expresión del rendimiento de una MPPEE del SSTAF podría ser la siguiente:

- **R** es un indicador del rendimiento de la matriz de propiedades emergentes bajo análisis.
- **PEd_m** es una **propiedad emergente deseada**, que fue detectada o que la incluimos en el escenario de análisis de la matriz de propiedades emergentes (MPPEE). Puede tomar valores de frecuencia relativa o valores entre 0 y 1.

$$R = \frac{\sum_m PEd_m \cdot Iped_m}{\sum_n PEnd_n \cdot Ipend_n}, m = 1, 2, \dots, M_{PEd}; n = 1, 2, \dots, N_{PEnd} \quad (1)$$

- **Iped_m** es el **impacto asociado a la propiedad emergente deseada**.
- **M_{PEd}** es el número de propiedades emergentes deseadas en la MPPEE.
- **PEnd_n** es una **propiedad emergente no deseada** que fue detectada o que la incluimos en el escenario de análisis de la MPPEE. Puede tomar valores de frecuencia relativa o valores entre 0 y 1.
- **Ipend_n** es el **impacto asociado a la propiedad emergente no deseada**.
- **N_{PEnd}** es el número de propiedades emergentes no deseadas en la MPPEE.

Si aumenta la ocurrencia de propiedades emergentes deseadas, cuyo impacto en la operación del sistema es elevado, y se busca minimizar la ocurrencia de propiedades emergentes no deseadas con alto impacto en la operación, observaremos que el rendimiento tiende a elevarse. En sentido contrario, si aumenta la ocurrencia de propiedades emergentes no deseadas, de alto impacto en la operación del sistema, y disminuye la ocurrencia de propiedades emergentes deseadas de alto impacto, el rendimiento tiende a cero.

Aquí se sostiene que el desarrollo de una resiliencia operativa robusta puede compensar la ocurrencia de propiedades emergentes no deseadas de alto impacto, permitiendo así la recuperación del sistema y el mantenimiento de un rendimiento deseado.

Para concluir, es importante destacar que en este trabajo se presentan conceptos como “propiedades emergentes”, “seguridad operacional emergente”, “rendimiento” y “resiliencia”, que difieren de los utilizados en otras investigaciones orientadas a establecer responsabilidades administrativas, civiles o penales. Nos referimos a conceptos como “fallas”, “causas”, “indicios”, etc., que son característicos del prevenciónismo y del modelo de análisis lineal.

Referencias

- Borrell Vives, J., Algaba García, P. y Martínez Raposo Piedrafita, J.B. (2000). Investigación de Accidentes de Tráfico. Academia de Tráfico de la Guardia Civil, Dirección General de Tráfico. (ISBN 84-8475-002-7).
- Bunge, M. (2004). Emergencia y convergencia. Novedad cualitativa y unidad de conocimiento. Gedisa, Barcelona.
- Bustos, V. (2012). Factores de riesgo en los siniestros de tránsito ocurridos en el departamento de San Martín durante el segundo semestre del año 2010. [Tesis de Licenciatura en Criminalística] Universidad del Aconcagua. http://bibliotecadigital.uda.edu.ar/objetos_digitales/406/tesis-4444-factores.pdf
- Hollnagel E., Woods D., Leveson N. (2006). Resilience Engineering: concepts and precepts. Ashgate, Farnham.
- Leonetti, A. (s.f.). Material didáctico de la cátedra Seguridad Operacional Ferroviaria de la Licenciatura en Gestión y Tecnología Ferroviaria. Universidad Nacional de San Martín.
- Leveson, N. (2004). System-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP). Safety Science, Vol. 42 (4), 237-270.
- Ludwig von Bertalanffy (1976). Teoría general de los sistemas. Fondo de Cultura Económica, México.
- Marchitto, M. (2011). El error humano y la gestión de seguridad: la perspectiva sistémica en las obras de James Reason. *Laboreal*. Vol. VII (2), 1-12. <https://doi.org/10.4000/laboreal.7750>
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate, Londres.
- Sosa, G. (2022). Razonamiento sistémico-matricial en sistemas sociotécnicos complejos aplicado al transporte ferroviario. *Revista de Seguridad Operacional*, 1, 44-50.