

Structural Equations Model for accident analysis based on the Human Factors Classification System in underground mines in Peru

Fiorella Romero-Ramos, BSc¹, Jeferson Trujillo-Torres, BSc¹, Vidal Aramburú-Rojas, MSc¹, and Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, U201517181@upc.edu.pe, U201517494@upc.edu.pe, pcgmvara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– Mining is an industry where workers interact in the different stages of mining exploitation in the face of innumerable risks that threaten their integrity. For this reason, investigations have been developed that have sought to solve this problem from different approaches. The contribution of this research is to generate an accident analysis model studying human factors with the application of the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) and the Structural Equations Model of minimal partial frames (PLS-SEM) to a qualitative and quantitative analysis. When applying this model to the analysis of accidents that occurred in underground mining in Peru, it was evidenced that organizational influences have a significant effect on external factors, this in turn has an effect on the preconditions for unsafe acts. Furthermore, unsafe leadership and the preconditions for unsafe acts have a significant and positive relationship on unsafe acts. In summary, it has been proven that the proposed hybrid model is appropriate for analyzing accidents in underground mines.

Keywords-- HFACS, PSL-SEM, Underground mining, Accidents, Human Factor

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.504>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Modelo de Ecuaciones Estructurales para el análisis de accidentes basado en el Sistema de Clasificación de Factores Humanos en minas subterráneas del Perú

Fiorella Romero-Ramos, BSc¹, Jeferson Trujillo-Torres, BSc¹, Vidal Aramburú-Rojas, MSc¹, and Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, U201517181@upc.edu.pe, U201517494@upc.edu.pe, pcgmvara@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– *La minería es una industria donde los trabajadores interactúan en las diferentes etapas de la explotación minera frente a innumerables riesgos que amenazan su integridad. Por esta razón se han desarrollado investigaciones que han buscado resolver este problema desde diferentes enfoques. El aporte de esta investigación es generar un modelo de análisis de los accidentes estudiando a los factores humanos con la aplicación del Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos (HFACS) y el Modelo de Ecuaciones Estructurales de mínimos cuadros parciales (PLS-SEM) para un análisis cualitativo y cuantitativo. Al aplicar este modelo para el análisis de los accidentes ocurridos en las mineras subterráneas del Perú se evidenció que las influencias organizacionales tienen un efecto significativo sobre los factores externos, este a su vez tiene un efecto sobre las condiciones previas para actos inseguros. Además, el liderazgo inseguro y las condiciones previas para actos inseguros tienen una relación significativa y positiva sobre los actos inseguros. En síntesis, se ha comprobado que el modelo híbrido propuesto es apropiado para analizar de los accidentes en minas subterráneas.*

Keywords– HFACS, PLS-SEM, Minería subterránea, Accidentes, Factor Humano

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en el sector minero se han implementado medidas de seguridad y tecnologías de vanguardia para prevenir los incidentes y accidentes. Pese a ello, las actividades que se realizan en minería son consideradas de alto riesgo [1]. La tasa de incidentes y accidentes en España por cada 100,000 trabajadores fue 4.3 veces mayor en el sector minero que la incidencia general entre todos los demás sectores en 2015 [2]. En el caso de China durante el período 2000 a 2016, hubo un total de 8,226 accidentes en las minas de carbón, que causaron 22,760 muertes [3]. En el Perú, en el año 2018 ocurrieron 4,568 accidentes entre leves, incapacitantes y mortales. La minería subterránea en este país concentra el mayor número de accidentes, en el 2019 un 64% de los accidentes mortales acontecidos en mediana y gran minería se dio en este escenario. Esto se debe a las condiciones geológicas propias del lugar, las características de los trabajadores, métodos operacionales y factores organizacionales.

Analizar los factores humanos que intervienen en los accidentes en minería subterránea es importante, debido a que, contribuye significativamente e implementa diversas mejoras en la seguridad para controlar y reducir la ocurrencia de accidentes [4], [5]. El factor humano o error humano

interviene en un 90% de los incidentes y accidentes en minería [1] [6]. Un estudio [7] modificó la técnica original HFACS adaptando al contexto minero considerando la terminología y un nivel más al analizar los accidentes, denominándolo HFACS-MI; donde se evidenció que el error humano juega un papel muy importante en los incidentes y accidentes, además aportó un punto de partida para estudiar los errores humanos en la industria minera. Otra investigación [8] un análisis sistemático evidenciando que los actos inseguros fueron consistente en largo periodos de tiempo, además de que el acto inseguro más común fue errores basados en habilidades; por otra parte brindó información para reducir los incidentes y accidentes.

La motivación de este estudio es demostrar que los accidentes ocurren por equivocaciones en la toma de decisiones en los diferentes niveles de una organización y no solo por errores del operador. Por ello, este estudio propone un nuevo modelo basado en el Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos y el Modelo de Ecuaciones Estructurales de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM, por sus siglas en inglés), con el fin de identificar los factores causales en los accidentes mortales ocurridos en minería subterránea del Perú.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Modelo de análisis de accidentes en minas subterráneas

El análisis de la ocurrencia de accidentes en una mina subterránea es complicado, por la intervención de múltiples factores intrínsecos de las labores subterráneas como la temperatura, humedad, presencia de gases y condiciones de tensión en las rocas; además de otros factores como la presencia de equipos mineros y las características individuales de los trabajadores [2] [9] [10]. Para conocer la causa raíz de los accidentes en las labores subterráneas, diferentes investigaciones, han optado por un análisis cuantitativo. Con la intención de estimar los riesgos y expresarlos a través de fórmulas matemáticas aprovechando de esa manera los datos de accidentes reales [2] [9] [11]. En cambio, los estudios cualitativos se basan principalmente en procesos de estimación analítica de los gestores de seguridad. En consecuencia, los estudios [10] [11], han determinado que el ambiente físico característico de las labores subterráneas y la estructura geológica son las causas básicas de los accidentes e incidentes. Por ende, a pesar de las medidas de control que los

trabajadores han ido adoptando en los frentes de producción y labores de acarreo han sido los más afectados por el desprendimiento de rocas [9] [10]. Por otro lado, el factor personal de los trabajadores también tuvo participación en la ocurrencia de los accidentes en relación a los años de experiencia, la edad, estado físico, actitud en el trabajo, habilidad en los trabajos y cumplimiento de normas [2] [9] [10] [11]. En relación al desempeño de las organizaciones, los factores que afectaron el nivel de seguridad en las actividades fueron la inversión, filosofía de seguridad, normas y reglamentos, supervisión, comunicación y el plan operativo [11].

B. Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos en minería subterránea

Los factores humanos o errores humanos son las causas de un alto porcentaje de accidentes en la industria minera, por ende, se han propuesto modelos en base al Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos. Dado que el HFACS es uno de los enfoques de sistemas más ampliamente utilizados por poseer un marco analítico básico que clasifica los factores contribuyentes como causales [1] [12]. Sin embargo, diversos autores mencionan que el marco del HFACS original proporciona un esquema que no considera los antecedentes de la industria minera ni los factores externos que intervienen indirectamente en un accidente. Con respecto a ello se realizaron modificaciones del esquema original considerando estos factores para un análisis más detallado y acorde al escenario [3] [4] [13]. Otra de las limitaciones del HFACS es que solo realiza un análisis cualitativo. Por ello al estudiar los factores humanos se emplearon técnicas de apoyo para realizar un análisis cualitativo y cuantitativo que abarque todos los factores que intervienen en los accidentes. Al integrar estos métodos, técnicas o modelos se busca mejorar la implementación de cada método y construir un modelo híbrido [3] [13]. Por otro lado, se identificó que los actos inseguros del trabajador son los factores humanos más críticos. Los cuales necesitan una rápida atención para evitar futuros incidentes y accidentes [1] [3] [13]. Dentro de este nivel, al identificar la categoría principal se evidencio que las violaciones fueron más graves en comparación a los errores, los conducen a un número mayor de accidentes [1] [3] [4].

C. Modelo de ecuaciones estructurales para el análisis de factores humanos en minería.

Los modelos de ecuaciones estructurales son expresiones matemáticas que estudian las relaciones entre las variables latentes y observadas, lo que permite realizar un estudio cuantitativo de diversas causas. Además, se emplea un enfoque que explica la causa de un accidente como la interacción y el acoplamiento entre los factores causales [14]. Diversos autores mencionan que emplear métodos de análisis sistemáticos combinado con ecuaciones estructurales ayudan a obtener una mejor comprensión de las relaciones e interacciones entre los componentes del sistema. Ya que se

realiza un análisis cualitativo y cuantitativo, además de complementarse entre ambas técnicas [15] [16]. En consecuencia, algunos autores afirmaron que las deficiencias organizacionales tienen efectos directos e indirectos sobre los actos inseguros referidos a las violaciones y los errores de los trabajadores. En lo referente a los efectos indirectos es una cadena de sucesos donde las influencias organizacionales tienen un impacto significativo sobre liderazgo inseguro y este sobre los actos inseguros [15] [16]. Por otra parte, también se menciona que el entorno externo tiene un impacto significativo en los actos inseguros; y el liderazgo inseguro sobre las condiciones previas para los actos inseguros [5] [16]. En conclusión, se ha demostrado que la aplicación del HFACS en combinación con el SEM o el PLS-SEM es un modelo ideal para el estudio de las causas de los accidentes y sus relaciones ampliando así el campo de análisis e identificando las principales deficiencias en las empresas mineras.

III. APORTE

A. Modelo

En el presente estudio se realizará la aplicación del sistema de análisis y clasificación de factores humanos (HFACS) previamente adaptado al contexto de la minería peruana, incluyendo más categorías de análisis. Los resultados obtenidos serán la base para establecer un modelo de ecuaciones estructurales de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) a fin de encontrar las interrelaciones entre los niveles que conforman a todo el sistema, para el cual se seguirá el proceso observado en la Fig. 1. Al adoptar este enfoque híbrido se busca demostrar que la toma de decisiones en un nivel superior influye en los diferentes niveles y como consecuencia se producen los actos inseguros en los operadores.

B. Aporte Detalle

1) HFACS

En esta investigación se añadió el quinto nivel, denominado factores externos; compuesto por dos categorías, geomecánica y otros factores. Además, en el nivel de actos inseguros se añadió la categoría errores ante emergencia; con la finalidad de realizar un análisis más genuino de los accidentes en el escenario peruano.

2) Validación de la modificación de la técnica

Se realizó la validación de la estructura modificada del HFACS con la participación de 4 expertos en el sector minero específicamente en el área de seguridad, quienes respondieron a un cuestionario de 28 enunciados, aplicando la "Escala de Likert", luego se procesó los datos en la Tabla 1.

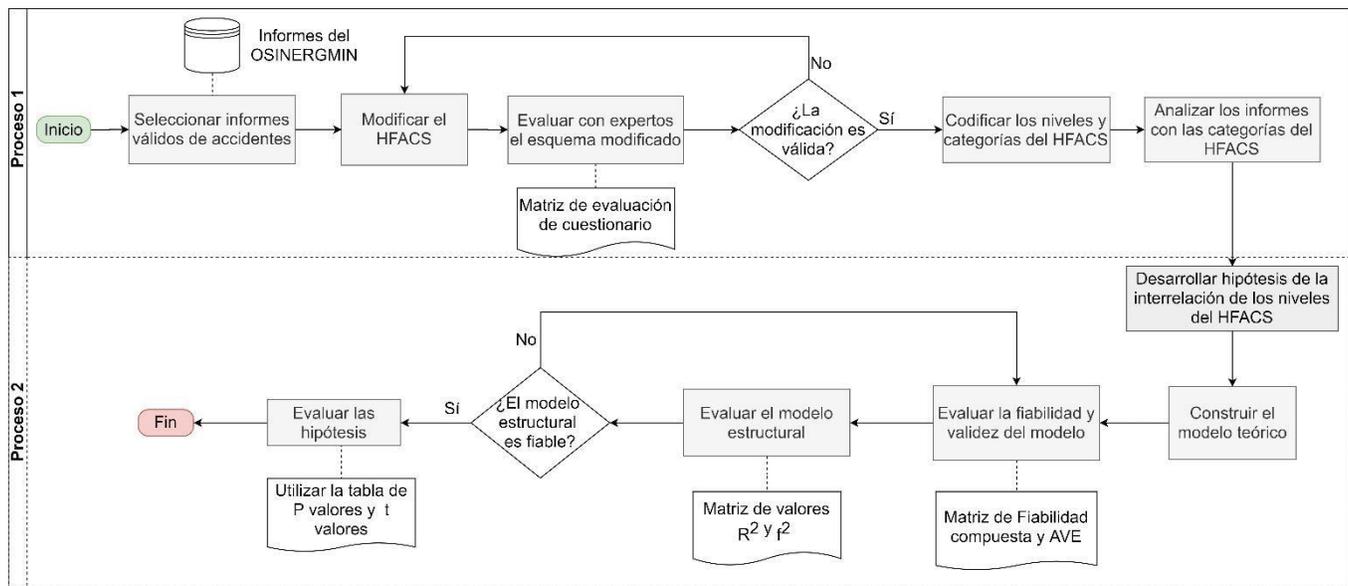


Fig. 1 Proceso del desarrollo del modelo híbrido HFACS y PLS-SEM .

TABLA I

MATRIZ DE VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO DESARROLLADO POR LOS EXPERTOS.

Experto	Enunciados del cuestionario					Σ por experto	Decisión
	1	2	...	27	28		
Experto 1	5	4		1	4	113	TA
Experto 2	4	4		2	3	90	DA
Experto 3	3	3		5	5	85	DA
Experto 4	2	5		4	5	140	TA
Σ por enunciado	14	16	...	12	17		
Criterio	0 – 28 → Totalmente en desacuerdo (TD) 29 – 56 → En desacuerdo (ED) 57 – 84 → Indiferente (I) 85 – 112 → De acuerdo (DA) 113 – 140 → Totalmente de acuerdo (TA)						

Nota: Los datos rellenos en la matriz sirven como ejemplo de aplicación, más no son datos de la investigación.

3) Aprobación– desaprobarción de hipótesis

En relación al modelo propuesto de la investigación, las hipótesis fueron evaluadas por medio del valor t y P (Tabla 2).

C. Indicadores del modelo

Los indicadores principales para la validación del aporte fueron tres, los cuales son:

1) Fiabilidad compuesta (FC)

Objetivo: Permite medir la consistencia interna de los indicadores por niveles, es decir las correlaciones simples de los indicadores con el nivel al que pertenecen para validar la fiabilidad del modelo de medida propuesto.

TABLA II

TABLA DE TOMA DE IDENTIFICACIÓN DE RELACIONES CAUSALES ENTRE NIVELES

Hipótesis	t valores	P valores	Decisión	
H ₁	X2 → X1	0.85	0.950	Rechazada
H ₂	X2 → X3	0.90	0.970	Rechazada
H ₃	X2 → X5	2.35	0.040	Aceptada
H ₄	X1 → X4	1.85	0.070	Rechazada
H ₅	X3 → X5	3.45	0.005	Aceptada
H ₆	X4 → X5	1.98	0.049	Aceptada
H ₇	X2 → X4	2.58	0.010	Aceptada
Criterios	t > 1.96 se acepta	P < 0.05 se acepta	¿Acepta o rechaza?	

Nota: Los datos rellenos en la matriz sirven como ejemplo de aplicación, más no son datos de la investigación.

$$\rho_c = \frac{(\sum \lambda_i)^2}{(\sum \lambda_i)^2 + \sum_i var(\varepsilon_i)} \quad (1)$$

Interpretación: Si la fiabilidad compuesta posee un valor de 0.8 a 0.9 significa que el modelo es adecuado para etapas avanzadas en una investigación. Por el contrario, si es menor a 0.7 el modelo posee un nivel modesto y es apto para investigaciones exploratorias.

2) Varianza extraída media (AVE)

Objetivo: Medir la validez convergente y divergente en el modelo propuesto para indicar que los reactivos representen a un único constructo subyacente.

$$AVE = \frac{\sum_{i=1}^i \lambda_i^2}{\sum_{i=1}^i \lambda_i^2 + \sum_i var(\varepsilon_i)} \quad (2)$$

Interpretación: Si el valor de la varianza media extraída es mayor o igual a 0.50 significa que esta categoría explica al menos el 50% de la varianza de los indicadores. Por el contrario, si es menor a 0.50, la varianza del error es mayor que la varianza explicada.

3) P valor

Objetivo: Determinar la validez de la hipótesis planteada en el modelo teórico, ya que el valor P define la probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible dada una hipótesis.

TABLA III
CALCULO DEL VALOR P EN RELACIÓN A LOS CASOS A, B Y C.

A	B	C
$H_0: \mu = \mu_0$	$H_0: \mu \leq \mu_0$	$H_0: \mu \geq \mu_0$
$H_1: \mu \neq \mu_0$	$H_1: \mu > \mu_0$	$H_1: \mu < \mu_0$
$t_c = \frac{x - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$		
$Pr\{ t_{n-1}\} > t_c $	$Pr\{t_{n-1}\} > t_c$	$Pr\{t_{n-1}\} < t_c$

Interpretación: Si el valor $P < 0.05$, la hipótesis es estadísticamente significativo por ende se acepta la hipótesis. Sin embargo, si el valor $P < 0.05$, la hipótesis no es estadísticamente significativa, en consecuencia, se rechaza dicha hipótesis.

IV. VALIDACIÓN

A. Escenario

Las minas subterráneas del Perú se caracterizan por la riqueza mineralógica que se encuentra en las vetas y yacimientos ubicadas por debajo de la superficie. La región central es principalmente polimetálica en donde se producen concentrados de plomo, plata y zinc; mientras que las regiones del norte del país se dedican a la extracción y producción de lingotes de oro y en el sur a la producción de cátodos de cobre. Para esta investigación se ha recopilado los informes publicados por el OSINERGMIN de los accidentes mortales ocurridos en minas subterráneas de mediana y gran minería del Perú desde el año 2013 hasta el 2018. En total se reunieron 103 informes con un registro de 110 víctimas mortales, sucedidos en 12 regiones del Perú.

B. Diseño de la validación

La base teórica para construir el modelo de ecuaciones estructurales fue el esquema de la técnica HFACS, adaptada al contexto peruano, para validar dicho esquema se recurrió a cuatro profesionales del sector minero para responder a un cuestionario de 28 enunciados según la "escala de Likert". Los resultados obtenidos (tabla 4) indican que los cuatro expertos estuvieron totalmente de acuerdo con el marco modificado del HFACS.

TABLA IV
MATRIZ DE VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO DESARROLLADO POR LOS EXPERTOS PARA LA VALIDACIÓN DEL MARCO DEL HFACS.

Experto	Enunciados del cuestionario					Σ por experto	Decisión
	1	2	...	27	28		
Experto 1	5	4		4	4	114	TA
Experto 2	5	5		4	3	133	TA
Experto 3	5	5		5	5	140	TA
Experto 4	5	5		5	1	136	TA
Σ por enunciado	20	19	...	18	13		
Criterio	$0 - 28 \rightarrow$ Totalmente en desacuerdo (TD) $29 - 56 \rightarrow$ En desacuerdo (ED) $57 - 84 \rightarrow$ Indiferente (I) $85 - 112 \rightarrow$ De acuerdo (DA) $113 - 140 \rightarrow$ Totalmente de acuerdo (TA)						

Luego se procede a la codificación de la estructura del HFACS y evaluación de los 103 informes de accidentes de acuerdo a la siguiente escala de nivel de influencia: 1-directamente, 2- principal, 4- involucrado. 5-no está involucrado. En la evaluación solo se analizaron 18 categorías, debido a que las categorías estado fisiológico adverso, aptitud para el trabajo y errores de percepción no fueron identificadas en los informes de accidentes.

En esta investigación se utilizó el software estadístico SmartPLS para desarrollar el modelo de ecuaciones estructurales de mínimos cuadros parciales. Para lo cual, primero se establecieron las hipótesis en relación a los niveles del HFACS.

H1: Influencias organizaciones tiene un efecto significativo sobre factores externos.

H2: Influencias organizaciones tiene un efecto significativo sobre liderazgo inseguro.

H3: Influencias organizaciones tiene un efecto significativo sobre actos inseguros.

H4: Factores externos tiene un efecto significativo sobre condiciones previas para actos inseguros.

H5: Liderazgo inseguro tiene un efecto significativo sobre actos inseguros.

H6: Condiciones previas para actos inseguros tiene un efecto significativo sobre actos inseguros.

H7: Influencias organizacionales tiene un efecto significativo sobre condición previa para actos inseguros.

Luego se planteó un diagrama del modelo teórico a partir de las hipótesis establecidas (figura 2). Se ejecutó el algoritmo PLS-SEM, en el cual si las cargas externas eran menores a 0.5 fueron excluidos del modelo uno por uno desde el valor más pequeño y solo se conservaron los que cumplían con ser mayor a 0.5. Después de identificar las categorías que se requerían en el modelo, se analizaron los datos nuevamente para evaluar la fiabilidad y validez mediante la metodología de PLS, cuyos resultados se observan en la tabla 5.

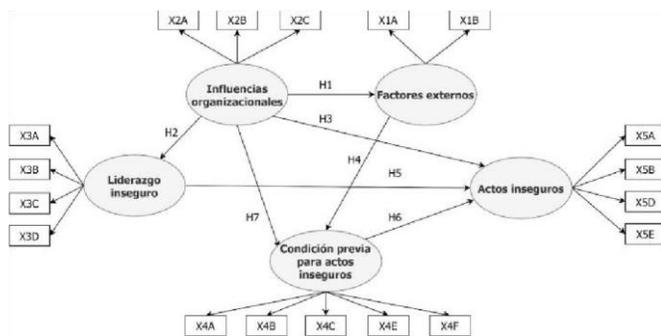


Fig. 2 Modelo teórico propuesto en base a la estructura del Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos.

Considerando que el modelo tiene validez y confiabilidad al cumplir con los parámetros establecidos se procedió a realizar la evaluación del modelo estructural. Primero se evaluó la colinealidad de los indicadores, los cuales se encuentran entre los valores de 1.000 a 1.776 y al evaluar los valores FIV (se encuentran entre 1.000 a 1.053) del modelo estructural se evidencia que no existe una multicolinealidad. Segundo se evaluó el R2 y f^2 (Tabla 6).

TABLA V
INDICADORES DE FIABILIDAD Y VALIDEZ DEL MODELO

Niveles	Cód.	Valor de FC	Valor de AVE	Decisión
Actos inseguros	X5	0.788	0.652	SI
Condiciones previas para actos inseguros	X4	0.771	0.628	SI
Liderazgo inseguro	X3	0.841	0.641	SI
Influencias organizacionales	X2	1.000	1.000	SI
Factores externos	X1	0.795	0.665	SI
<i>Criterios</i>		<i>FC > 0,7, valido</i>	<i>AVE > 0,5, valido</i>	<i>¿Los datos son fiables y válidos?</i>

En la figura 3, se observa que, las condiciones geomecánicas (peso indicador, 0.937) tuvo un efecto mayor en comparación con la otra categoría en el nivel de factores externos. Dado que en influencias organizacionales solo se conservó la categoría gestión de recursos, este tuvo el mayor peso. De los 3 indicadores de Liderazgo inseguro, las operaciones planificadas inapropiadamente (peso indicador, 0.867) tuvo un efecto mayor y el liderazgo inadecuado (peso indicador, 0.671) tuvo un menor efecto. En el nivel de condición previa para actos inseguros, la categoría que tuvo el mayor peso fue entorno tecnológico (peso indicador, 0.828) en comparación a limitaciones físicas/mentales (peso indicador, 0.755). En el nivel de actos inseguros se observa que errores de decisión (0.880) posee un mayor peso en comparación con violaciones del trabajador (0.728).

TABLA VI
MATRIZ DE EVALUACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

Niveles	Valor de f^2					Valor de R^2
	X1	X2	X3	X4	X5	
X1				0.148		5.10 %
X2	0.053		0.001	0.012	0.000	
X3					0.092	0.01 %
X4					0.114	15.90 %
X5						17.30 %
<i>Criterio</i>	<i>0.02, efecto pequeño; 0.15, efecto medio; 0.35 efecto grande [17].</i>					<i>2%, efecto pequeño; 13% efecto medio; 26% efecto grande [18].</i>

Por otra parte, este modelo nos permite identificar que 4 de las 7 hipótesis son válidas ya que cumplen con un valor estadístico $t > 1.96$

indicando que las relaciones son significativas desde el punto de vista estadístico, además cada uno de ellos tiene un valor P menos a < 0.05 , (Tabla 7).

TABLA VII
IDENTIFICACIÓN DE RELACIONES CAUSALES ENTRE LOS NIVELES

Hipótesis		T valores	P valores	Decisión
H1	X2 - X1	2.038	0.042	Aceptada
H2	X2 - X3	0.318	0.751	Rechazada
H3	X2 - X5	0.047	0.963	Rechazada
H4	X1 - X4	4.586	0.0001	Aceptada
H5	X3 - X5	2.579	0.010	Aceptada
H6	X4 - X5	3.093	0.002	Aceptada
H7	X2 - X4	1.187	0.236	Rechazada
Criterios		$t > 1.96$ se acepta	$P < 0.05$ se acepta	¿Se Acepta o rechaza?

En relación a la hipótesis 1 se confirma que las influencias organizaciones tiene un efecto significativo sobre los factores externos, el cual representa una influencia directa y negativamente. Por otro lado, la hipótesis 4 nos indica que los factores externos tienen un efecto significativo sobre condiciones previas para actos inseguros, el cual confirma que hay una relación directa y negativa sobre esta variable. Además, se confirma que la hipótesis 5 es significativa demostrando que hay una relación directa y positiva entre liderazgo inseguro sobre actos inseguros. Por último, en relación a la hipótesis 6 se concluye que existe una relación significativa y positiva entre condiciones previas para actos inseguros y actos inseguros.

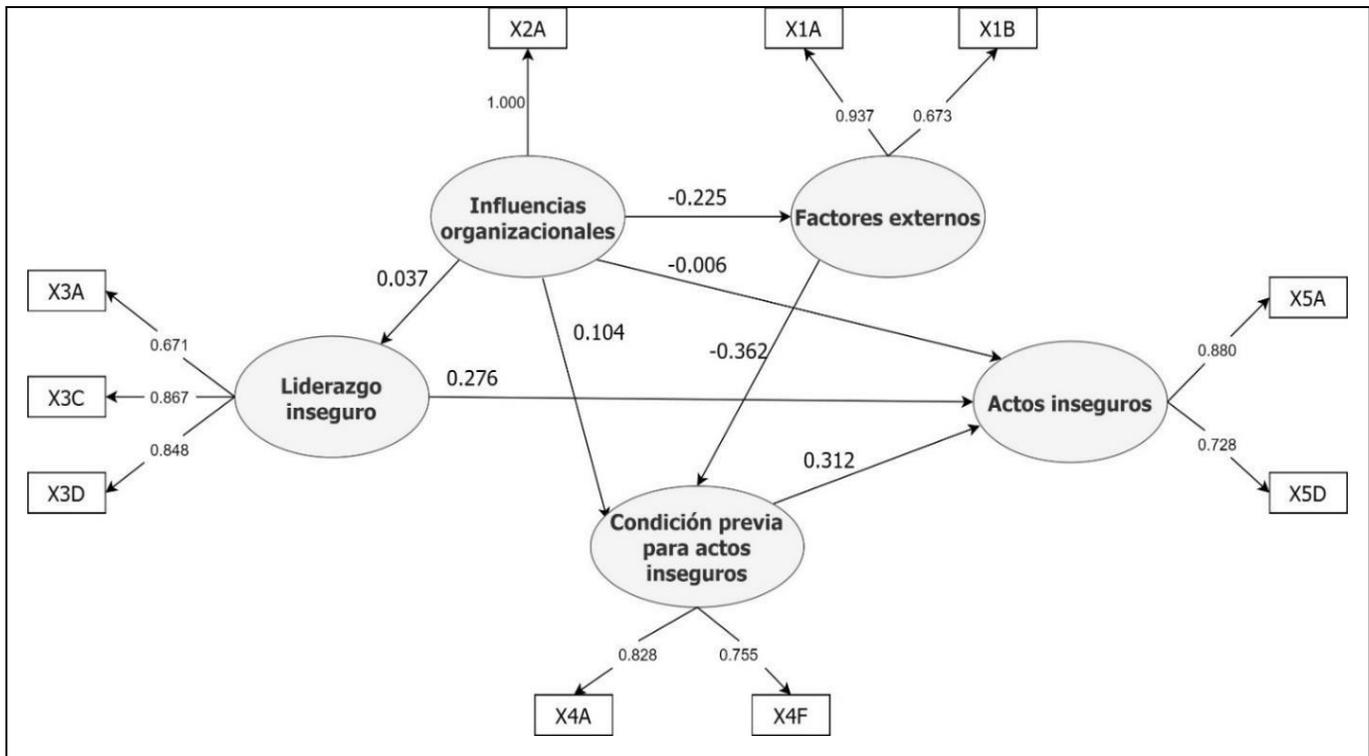


Fig.3 Modelo final de los factores causales en los accidentes subterráneos en Perú.

Al comparar los valores del FC y AVE de esta investigación con los resultados de los estudios previos se evidencia que cumplen con la condición de ser mayores a 0.7 y 0.5 respectivamente, Por otro lado, al comparar los valores p de las hipótesis establecidas en el estudio [16] con los de esta investigación, se afirma que las influencias organizacionales influyen directamente sobre los factores externos. Además, las condiciones previas para actos inseguros influyen directamente en los actos inseguros. En cambio, la hipótesis referida a que las influencias organizacionales influyen en el liderazgo inseguro se evidencio que para este escenario no se cumple debido a su valor p de 0.751. Esta diferencia se debe a que los estudios analizan diferentes escenarios. En relación a la segunda investigación [6], la hipótesis 3 está relacionada a la hipótesis 1 de este estudio, ya que se indica que las organizaciones a través de las normas y reglamentos inseguros influyen sobre el ambiente de trabajo en labores mineras.

V. CONCLUSIONES

La aplicación del modelo de ecuaciones estructurales en combinación con el análisis de factores humanos permite conocer los factores causales que intervienen en los accidentes, además de la relación entre los niveles para identificar la ruta de causalidad en un accidente. Cabe resaltar que es necesario realizar una modificación del marco original del HFACS para que se adapte al escenario de análisis, en este estudio se incluyeron un nivel, factores externos y tres

categorías como son condiciones geomecánicas, otros factores y errores ante emergencias.

En diversas investigaciones [5], [19] se identifica que los actos inseguros del trabajador son las principales causas de la ocurrencia de accidentes. En esta investigación se identifica que errores de decisión (peso indicador, 0.880) posee un mayor peso en comparación con violaciones del trabajador (peso indicador, 0.728). Si bien es cierto que las violaciones y los errores son los factores que intervienen. También se debe considerar que el liderazgo inseguro ($p=0.010$) y las condiciones previas para actos inseguros ($p=0.002$) han influido de manera directa en los actos inseguros.

Esta investigación permite confirmar que los accidentes ocurridos en las labores subterráneas no sólo se deben a las condiciones extremas del ambiente de trabajo o los errores de los trabajadores, sino que son resultados de múltiples factores relacionados a la organización, planificación de los trabajos y la supervisión de los líderes.

REFERENCIAS

- [1] J. Bonsu, W. Van Dyk, J. P. Franzidis, F. Petersen, and A. Isafiade, "A systemic study of mining accident causality: An analysis of 91 mining accidents from a platinum mine in South Africa," *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 117, no. 1, pp. 59–66, 2017.
- [2] L. Sanmiquel, M. Bascompta, J. M. Rossell, H. F. Anticoi, and E. Guash, "Analysis of Occupational Accidents in Underground and Surface Mining in Spain Using Data-Mining Techniques.," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 3, 2018.

- [3] R. Liu, W. Cheng, Y. Yu, and Q. Xu, "Human factors analysis of major coal mine accidents in China based on the HFACSInt. J. Ind. Ergon., vol. 68, pp. 270–CM model 279, Nov. and AHP method," 2018.
- [4] Y. Feng, H. Chen, Y. Zhang, and L. Jing, "The hybrid systems method integrating human factors analysis and classification system and grey relational analysis for the analysis of major coal mining accidents," *Syst. Res. Behav. Sci.*, vol. 36, no. 4, pp. 564–579, Dec. 2019.
- [5] R. Liu, W. Cheng, Y. Yu, Q. Xu, A. Jiang, and T. Lv, "An impacting factors analysis of miners' unsafe acts based on HFACS-CM and SEM," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 122, pp. 221–231, Feb. 2019.
- [6] Y. Zhang, W. Shao, M. Zhang, H. Li, S. Yin, and Y. Xu, "Analysis unsafe conditions of the rules and regulations as exogenous coal mine accidents using structural equation modeling with variables," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 92, pp. 189–201, Jul. 2016.
- [7] J. Patterson, "Human error in mining: A multivariable analysis of mining accidents/incidents in Queensland, Australia and the United States of America using the human factors analysis and classification system framework," Clemson University, 2009.
- [8] J. Patterson and S. Shappell, "Operator error and system deficiencies: Analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 42, no. 4, pp. 1379–1385, Jul. 2010.
- [9] H. H. Erdogan, H. S. Duzgun, and A. S. Selcuk-Kestel, "Quantitative hazard assessment for Zonguldak Coal Basin underground mines," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 3, pp. 453–467, May 2019.
- [10] F. Yasli and B. Bolat, "A risk analysis model for mining accidents using a fuzzy approach based on fault tree analysis," *J. Enterp. Inf. Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 577–594, Jul. 2018.
- [11] L. Wang, Q. Cao, and L. Zhou, "Research on the influencing factors in coal mine production safety based on the combination of DEMATEL and ISM," *Saf. Sci.*, vol. 103, pp. 51–61, Mar. 2018. [12] Y. Zhang, L. Jing, Q. Bai, T. Liu, and Y. Feng, "A systems approach to extraordinarily major coal mine accidents in China from 1997 to 2011: an application of the HFACS approach," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 25, no. 2, pp. 181–193, Apr. 2019.
- [12] S. Verma and S. Chaudhari, "Safety of Workers in Indian Mines: Study, Analysis, and Prediction," *Saf. Health Work*, vol. 8, no. 3, pp. 267–275, Sep. 2017.
- [13] S. Hu, Z. Li, Y. Xi, X. Gu, and X. Zhang, "Path analysis of causal factors influencing marine traffic accident via structural equation numerical modeling," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 4, p. 96, Apr. 2019.
- [14] M. Mirzaei, H. Aghaei, O. Kalatpour, A. R. Soltanian, and M. SeyedTabib, "Effects of human and organizational deficiencies on workers' safety behavior at a mining site in Iran," *Epidemiol. Health*, vol. 40, p. e2018019, 2018.
- [15] F. S. Pratama, D. H. Syaifullah, and B. N. Moch, "Evaluation of factors affecting workplace accident at MUTU coal company using human factor analysis and classification system for coal mines," in
- [16] ACM International Conference Proceeding Series, 2019, pp. 291–295.
- [17] M. Martínez Ávila and E. Fierro Moreno, "Application of the PLS- SEM technique in Knowledge Management: a practical technical approach," *RIDE Rev. Iberoam. para la Investig. y el Desarro. Educ.*, vol. 8, no. 16, pp. 130–164, Feb. 2018.
- [18] Cohen Jacob, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2st editio. New York: Elsevier, 1977.
- [19] M. Mirzaei Aliabadi, H. Aghaei, O. Kalatpour, A. R. Soltanian, and M. SeyedTabib, "Effects of human and organizational deficiencies on workers' safety behavior at a mining site in Iran," *Epidemiol. Health*, vol. 40, p. e2018019, May 2018.