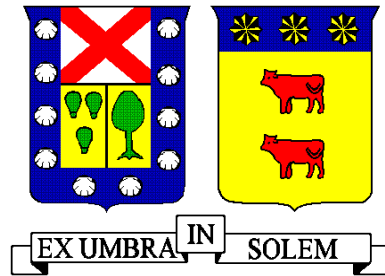


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



**MODELO PREDICTIVO DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR VOLADURA EN CAMPO
LEJANO MINA ZALDIVAR UTILIZANDO TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING**

JUAN CARLOS ABURTO INOSTROZA

Memoria para optar el título profesional de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:
Claudio Gajardo
Profesor Patrocinante:
Dr. Rodrigo Estay

Marzo 2023

*Dedicado a mi familia,
quienes siempre me creyeron capaz,
forjaron en mí una gran admiración por las artes y la ciencia,
me alejaron de los caminos sombríos de nuestra sociedad,
no permitieron que me influenciara la cultura pop del absurdo,
me enseñaron el valor del esfuerzo y la meritocracia.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer encarecidamente a mi familia, Juan Aburto Pinilla, Estrella Inostroza Monroy y Daniela Aburto Inostroza, junto a mi pareja Eleonora Parra Soto, quienes me han apoyado en todo el proceso universitario y saben que esta siempre fue mi meta desde la educación media. Son mi motivación día a día.

Quiero agradecer a Claudio Gajardo y Max Ortíz por su enseñanza, soporte y motivación dentro de mis primeros pasos por la gran industria de la minería metálica, así como en el desarrollo de esta memoria, también agradecer al equipo de ENAEX-CMZ, ambos turnos siempre tuvieron gran disponibilidad frente a mis consultas y me recibieron gratamente en la oficina técnica de Antofagasta.

Mención honrosa a mis amigos Javier Salvador, Sebastian Garín, Bastián Azuga, Felipe Mednik, Francisca Medina y Josefa Gamboa, por su amistad, preocupación y apoyo en los momentos alegres y difíciles.

“Si quieres descubrir los secretos del universo piensa en términos de energía, frecuencia y vibración”
Nikola Tesla.

RESUMEN

Las vibraciones inducidas por voladura son un efecto secundario no deseado. Su efecto principal es fragmentar el macizo rocoso para permitir el proceso aguas abajo. Al detonar, el explosivo genera gases a alta presión que actúan en el campo cercano y ondas mecánicas que viajan por el medio pudiendo recorrer grandes distancias. Las vibraciones tienen doble ámbito de actuación sobre el macizo, afectan la integridad o parámetros resistentes de estas y pueden llegar a provocar colapsos en los taludes al introducir fuerzas desestabilizadoras.

El aumento en el tamaño de las voladuras, tiene el fin de lograr economía de escala, disponiendo de un mayor volumen de material fragmentado para disminuir las interrupciones operacionales. Debido a ello ha aumentado el interés de medir la interacción que tienen las vibraciones con el macizo rocoso.

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño predictivo de los principales modelos empíricos de vibraciones inducidas por voladura. Analizando un conjunto de datos de vibraciones de campo lejano inducidas por voladura en Fase 8 Mina Zaldívar. Estos datos fueron capturados por geófonos superficiales automatizados entre el 06/03/21 hasta el 05/03/22. Durante el trabajo de memoria se busca comparar el desempeño obtenido de la metodología propuesta contra el desempeño que logra el lineamiento clásico propuesto por la Sociedad Internacional de Minería y Metalurgia [1]. Este último considera que un mejor ajuste representado por el coeficiente de determinación R^2 implica un mejor desempeño una vez calibrado el modelo de Devine.

Para ello se calibraron los modelos, se validaron usando k-grupos, se determinó el intervalo 95% de confianza de los parámetros calibrados, el coeficiente de determinación y la raíz del error cuadrático medio RMSE. Finalmente se realizó un testeo discretizado que convierte la velocidad máxima de partícula en categorías que tienen un ancho de 3 [mm/s], esto debido a que esa precisión es suficiente para aplicaciones de campo lejano. Ya que permitiría asociar un rango de velocidad de vibraciones a observaciones, medidas de deformación u otro criterio de daño. Además, se crea una condición binaria, si la predicción se aleja más de una categoría al valor real, el modelo no es aceptable, en otras palabras, solo puede errar a la categoría adyacente, obteniendo un modelo predictivo consistente.

Los principales resultados son: el modelo con mejor rendimiento tanto en carga total como para carga por retardo es el modelo de Ghosh, logrando una precisión de 73% y 57% respectivamente en el testeo discretizado, cumpliendo en ambos casos con no errar por más de una categoría en su predicción. Se confirmó que el lineamiento clásico de calibrar el modelo de Devine es un procedimiento poco robusto, ya que este modelo alcanzó una precisión de 67% y 29% respectivamente, no cumpliendo en ningún caso con la condición binaria. De esto se desprende que, en este estudio, el mecanismo de amortización elástico sí tiene una influencia considerable en el desempeño de modelos predictivos de campo lejano.

El algoritmo regresión de procesos gaussianos es el único algoritmo que logró un desempeño similar al modelo de Ghosh, obteniendo el mismo porcentaje de precisión y un RMSE de validación levemente menor. Por lo tanto, el aprendizaje de máquina testado no representa una ventaja significativa respecto a los modelos empíricos, debido a que estos últimos son más fáciles de interpretar.

Finalmente se propuso una metodología para ubicar los geófonos que tienen por finalidad estudiar el daño generado al macizo a través de las ondas mecánicas que llegan al campo lejano.

ABSTRACT

Blast-induced vibrations are an unwanted side effect. Its main effect is to fragment the rock mass to allow the downstream process. When the explosive detonates, it generates high pressure gases that act in the near field and mechanical waves that travel through the medium and can travel long distances. Vibrations have a double scope of action on the massif, they affect the integrity or resistant parameters of the massif and can cause collapse of the slopes by introducing destabilizing forces.

The increase in the size of blasting, in order to achieve economy of scale, having a greater volume of fragmented material available to reduce operational interruptions. There has been an increased interest in measuring the interaction of vibrations with the rock mass.

The objective of this work is to evaluate the predictive power of the main empirical models, using both delay loading and total system loading. Analyzing a dataset of far-field vibrations induced by blasting in phase 8 Zaldívar Mine. These data were captured by automated surface geophones between 06/03/21 and 05/03/22. During the memory work we seek to compare the classical approach of calibrating the Devine model. This considers that a better fit represented by the coefficient of determination R^2 implies a better predictive model.

For this purpose, the models were calibrated, validated using k-folds, the 95% confidence interval of the calibrated parameters, the coefficient of determination and the root mean square error RMSE were determined. Finally, a discretized test was performed that converts the maximum particle velocity into categories that have a width of 3 [mm/s]. This is because this accuracy is sufficient for far-field applications. Since it would allow associating a range of vibration velocity to observations, strain measurements or other damage criteria. In addition, a binary condition is created, if the prediction is more than one category away from the real value, the model is not acceptable, in other words, it can only err to the neighboring category, obtaining a consistent predictive model.

The main results are: the model with the best performance both in total load and delay load is Ghosh's model, achieving an accuracy of 73% and 57% respectively in the discretized test, complying in both cases with not missing more than one category in its prediction. It was confirmed that the classical approach of calibrating the Devine model is a not very robust procedure, since this model achieved an accuracy of 67% and 29% respectively, not complying in any case with the binary condition. It follows that, in this study, the elastic amortization mechanism does have a considerable influence on the performance of far-field predictive models.

The Gaussian process regression algorithm is the only algorithm that achieved similar performance to the Ghosh model, obtaining the same percentage accuracy and a slightly lower validation RMSE. Therefore, the tested machine learning does not represent a significant advantage over empirical models, because the latter are easier to interpret.

Finally, a methodology was proposed to locate the geophones that aim to study the damage generated to the massif through the mechanical waves that reach the far field.

LISTA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE CONTENIDOS	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. ANTECEDENTES	3
3.1. NORMAS DE VIBRACIONES	4
4. DATOS	8
4.1. FASE 8 MINA ZALDÍVAR.....	8
4.2. CONFIGURACIONES DE CARGA	10
4.3. BASE DE DATOS	11
5. METODOLOGÍA.....	12
5.1. MODELOS EMPÍRICOS.....	12
5.2. MODELOS DE APRENDIZAJE DE MÁQUINA	14
5.3. CALIBRACIÓN	16
5.4. VALIDACIÓN	17
5.5. TESTEO	18
6. RESULTADOS	19
6.1. CASO POZO AISLADO.....	21
6.2. CASO CARGA POR RETARDO.....	23
6.2.1. CALIBRACIÓN	23
6.2.2. VALIDACIÓN	24
6.2.3. TESTEO.....	24
6.3. CASO CARGA COMPLETA	25
6.3.1. CALIBRACIÓN	25
6.3.2. VALIDACIÓN	26
6.3.3. TESTEO.....	26
6.4. APRENDIZAJE DE MÁQUINA.....	27
7. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.	28
8. BIBLIOGRAFÍA	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (Izquierda) Ubicación de los 3 geófonos automatizados en Mina Zaldívar. (Derecha) ubicación de Fase 8 (zona derecha superior) y Fase 9 (zona izquierda interior).....	8
Figura 2: (Zona superior) Fase 8, compuesta de dos unidades geotécnicas de voladura, una dura (roja) y una media (amarillo). (Zona inferior) Fase 9, compuesto de material medio.....	9
Figura 3: Ajuste de la superficie modelada por Devine a los datos medidos en Fase 8 por el Geófono 3.....	17
Figura 4: Diagrama de validación cruzada 4-Grupos.....	17
Figura 5: Matriz discreta para la variable objetivo, velocidad máxima de partícula.....	18
Figura 6: Distancia no registrada por geófono de vibraciones campo lejano en celeste, distancia registrada entre lo coloreado.....	19
Figura 7: Ejemplo del procedimiento de posicionamiento de geófono, no está a escala.....	21
Figura 8: Factor de aumento de la mediana y el máximo al comparar vibraciones de pozo aislado respecto a las vibraciones de voladura de sistema completo.....	22
Figura 9: Precisión que logra cada modelo para las aproximaciones de carga completa y carga por retardo.....	28
Figura 10: Diagrama del efecto sónico [13] donde cd es la velocidad de detonación del explosivo cs es la velocidad de la onda S en el macizo rocoso y cp es la velocidad de la onda P en el macizo rocoso.....	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Rangos típicos de parámetros en vibraciones inducidas por voladura tanto en campo cercano como lejano.	4
Tabla 2: Resumen de NCh 3577, velocidad máxima de partícula permitida según tipo de estructura.....	5
Tabla 3: Valores de velocidad crítica para dos factores de seguridad estáticos dados [4].....	6
Tabla 4: Diseño geométrico de voladuras de producción en Fase 8 y Fase 9.....	9
Tabla 5: Características de los explosivos utilizados en voladuras Mina Zaldívar.....	10
Tabla 6: Mecanismos de atenuación de la velocidad de vibración [8].....	12
Tabla 7: Resumen de modelos empíricos para predecir máxima velocidad de partícula en el campo lejano.....	13
Tabla 8: Calibración de modelos con carga por retardo, R^2 es el coeficiente de determinación, RMSE es la raíz del error cuadrático medio.....	23
Tabla 9: Resultados intervalos de confianza mediante Bootstrap para configuración de carga por retardo.....	23
Tabla 10: Coeficiente de determinación y error cuadrático promedio de validación cruzada para configuración de carga por retardo.....	24
Tabla 11: Resultados de testeo discretizado para modelos con carga por retardo.....	24
Tabla 12: Calibración de modelos con carga completa del sistema, R^2 es el coeficiente de determinación, RMSE es la raíz del error cuadrático medio.....	25
Tabla 13: Resultados intervalos de confianza mediante Bootstrap para configuración de carga completa.....	25
Tabla 14: Coeficiente de determinación y error cuadrático promedio de validación cruzada para configuración de carga completa.....	26
Tabla 15: Resultados de testeo discretizado para modelos con carga completa.....	26
Tabla 16: Evaluación de modelos de aprendizaje de maquina implementado en aplicación "Regression Learner" MATLAB.....	27

1. INTRODUCCIÓN

La explotación superficial de cobre debe su gran tamaño a lograr economías de escala que permitan realizar una operación rentable. La mina debe estar en condiciones de estabilidad óptimas durante la duración del proyecto, incluyendo su cierre.

La operación unitaria de “voladura” consiste en fragmentar la roca para permitir las siguientes etapas del proceso minero, carguío y transporte. Generando beneficios aguas abajo. La voladura consiste en una reacción química violenta que convierte el explosivo sólido en gas, liberando grandes cantidades de energía, generando gas a alta presión y ondas mecánicas de volumen que viajan por el macizo rocoso [1].

En CINTEX se definen las vibraciones como “un movimiento cíclico que ocurre dentro de un medio debido al paso de fases alternativas de compresión y tensión, se considera que es producida en el frente de detonación del explosivo”, por lo tanto, es una onda mecánica que viaja por el macizo rocoso.

Estas vibraciones pueden generar daño al macizo afectando sus parámetros resistentes o causar colapsos debido a los esfuerzos desestabilizadores. “las vibraciones [...] representan un estado de esfuerzo inducido en el macizo rocoso” [2] lo que fragmenta el polígono objetivo, pero también puede causar daños al macizo rocoso adyacente.

La motivación para realizar una campaña vibrográfica puede ser evitar que un bloque falle, modelar la magnitud a la que es expuesto el macizo rocoso que no deseamos dañar o cumplir con normas para obra civil, como mantener las vibraciones bajo 12[mm/s] según la oficina de minas de EE. UU. [3]. Incluso una tesis doctoral afirma que “el modelamiento y predicción de vibraciones generadas por voladura se han vuelto más importante como consecuencia de la percepción negativa general del público hacia esta actividad minera” [4].

En este caso en particular ENAEX en su contrato con Mina Zaldívar ha instalado 3 geófonos automatizados, que registran constantemente las vibraciones generadas por voladura, subiéndolas a la red vía internet móvil. Esto con la finalidad de medir la interacción que tienen las vibraciones con el macizo rocoso en el campo lejano, que corresponde a distancias desde la voladura mayores a 5 veces el largo de la carga explosiva.

El objetivo de este estudio es evaluar el desempeño predictivo de los principales modelos empíricos, a través del análisis de datos de voladuras en Mina Zaldívar. Para ello se propone una metodología robusta que incluye calibración, validación, determinación de intervalos de confianza y testeo discretizado.

Una vez determinado el mejor modelo empírico se comparará su desempeño contra los algoritmos de aprendizaje de máquina implementado en MATLAB: regresión lineal, máquina de soporte de vectores y regresión de procesos gaussianos. Para estudiar si se logra una ventaja sustancial respecto a los modelos empíricos.

Para esto usamos técnicas como la validación cruzada, técnica de re-muestreo Bootstrap para determinar intervalos de confianza que caracterizan la incertidumbre y un testeo discreto que se adapta a las necesidades de precisión propias de este problema. Además, se estudia la ubicación de los geófonos y su impacto en el dominio del modelo predictivo, se propone una metodología para ubicarlo al comienzo del campo lejano sin exceder sus limitaciones técnicas. Se revisan los mecanismos detrás de los modelos empíricos, las normas de vibraciones y los valores guías que da la literatura.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo corresponde a:

Evaluar el desempeño predictivo de los principales modelos empíricos, analizando los datos de vibraciones de campo lejano inducidas por voladuras de producción en Fase 8 Mina Zaldívar, capturados por geófonos automatizados superficiales.

Para cumplir con lo anterior, se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

- Determinar si el mecanismo de amortización inelástica influye en el modelamiento de las vibraciones inducidas por voladura en campo lejano.
- Comparar el desempeño predictivo de algoritmos de regresión lineal, máquina de soporte de vectores y proceso de regresión gaussiana, contra el modelo empírico más robusto.

Los modelos calibrados obtenidos en este trabajo no son extrapolables a otras minas a cielo abierto, ya que son representativos de la complejidad mineralógica y estructural del macizo rocoso particular de Fase 8.

La cantidad de datos está limitada al registro realizado desde 06-03-21 hasta 05-03-22 en mina Zaldívar a través de un sistema automatizado de 3 geófonos superficiales de posición fija.

3. ANTECEDENTES

Las vibraciones son un efecto no deseado de la voladura, esta “trae consigo numerosos efectos [...] el primario quebrar, fracturar el mineral. Los efectos secundarios producen proyecciones de roca y formación de vibraciones sísmicas” [5].

Los efectos de las vibraciones inducidas pueden separarse en dos categorías, permanentes y transitorios. Los primeros generan desplazamientos permanentes adyacente al explosivo, como degradación (intensidad de fracturas). Los segundos generan desplazamientos transitorios, donde el máximo desplazamiento dura menos de 1/100[s]. Los efectos transitorios estructurales comenzando desde los más cercanos a la voladura son [6]:

- Distorsión estructural.
- Desplazamiento de fallas o grietas.
- Caídas de objetos.
- Agrietamiento cosmético de revestimiento de paredes.
- Respuesta excesiva de instrumentos y maquinaria.
- Respuesta humana.

Las vibraciones en el campo lejano se consideran como transitorias, normalmente se observa una respuesta elástica del macizo frente a las vibraciones. El campo lejano se define como el dominio radial de distancia mayor a 5 veces el largo de la carga explosiva [7], mientras que el campo cercano es el dominio desde la voladura hasta 5 veces el largo de la carga. En general ambos campos se diferencian porque en el campo cercano las vibraciones alcanzan una magnitud del orden de los 1000 [mm/s] y la influencia de los gases genera desplazamientos permanentes. Mientras que en el campo lejano no hay influencia de los gases generados por la explosión y las vibraciones tienen una menor magnitud.

Físicamente las vibraciones inducidas son ondas mecánicas que viajan por el macizo rocoso, estas “representan un estado de esfuerzo inducido [...] resultando en la fragmentación de la roca, pero también en daño al macizo rocoso adyacente” [2]. Respecto a la generación de las vibraciones “se considera que estas son producidas en el frente de detonación del explosivo, donde este es convertido en gas, y la densidad del gas es aún igual a la densidad del explosivo sólido” [2].

Para comprender las magnitudes que operan en el fenómeno, se presenta la Tabla 1, donde se definen los rangos típicos de los parámetros de voladura asociados a vibraciones. Tener en consideración que abarca ambos campos, cercano y lejano.

Tabla 1: Rangos típicos de parámetros en vibraciones inducidas por voladura tanto en campo cercano como lejano [7].

Parámetro	Rango típico
Desplazamiento de partícula	$10^{-4} - 10$ [mm]
Velocidad de partícula	$10^{-4} - 10^3$ [$\frac{mm}{s}$]
Aceleración de partícula	$10 - 10^5$ [$\frac{mm}{s^2}$]
Duración de pulso	$0.5 - 2$ [s]
Longitud de onda	$30 - 1500$ [m]
Frecuencia	$0.5 - 200$ [Hz]
Deformación	$3 - 5000$ [$\mu\epsilon$]

El instrumento utilizado es el geófono, este “da una medición directa de la velocidad, consiste por lo general en un sistema de bobina móvil soportada por un resorte y un imán fijo” [5]. Este instrumento normalmente es construido según en qué campo se va a utilizar, en campo lejano suelen soportar no más de unos 250[mm/s] y captan desde 1 o 2[Hz] en frecuencia, mientras que en campo cercano soportan del orden de 1000[mm/s] y captan desde 30[Hz].

La elección de la velocidad sobre otras magnitudes que se pueden medir del fenómeno, como el desplazamiento de partícula o la aceleración no se debe solo a la fácil instalación del geófono, se basa en el estudio llevado a cabo por la oficina de minas de EE.UU. donde se concluye “el grado de daño a una estructura está más estrechamente relacionado con la magnitud de la velocidad de partícula” [3]. Este estudio y subsiguientes reportes, así como investigaciones de otros países, impusieron con fundamentos el uso de la velocidad como un indicador de daño de las vibraciones inducidas por explosivos.

Las vibraciones tienen doble ámbito de actuación sobre los macizos rocosos, “por un lado, afectan a la integridad de las rocas o parámetros resistentes de estas y por otro, pueden llegar a provocar colapsos en los taludes la introducir acciones desestabilizadoras” [6].

El interés de estudiar esta interacción vibraciones – macizo rocoso en el campo lejano, viene del aumento del tamaño de voladuras, que ocurre debido a la búsqueda de la economía de escala en voladura y el interés de lograr mayor volumen de material fragmentado para disminuir las interrupciones operacionales. “Con el aumento en el tamaño de las voladuras existe un correspondiente aumento en los efectos secundarios [...] en particular, un potencial incremento en los niveles de vibraciones sísmicas y de superficie” [5].

Una aproximación recomendada para caracterizar las UGTB (Unidad Geotécnica de Voladura) es realizar voladuras de prueba, para lo cual debe usarse “mínimamente dos y óptimamente cuatro (geófonos), incluyendo uno en caso de fallo” [6], se recomienda ubicar estos instrumentos “en línea recta sobre una misma geología” [6] para caracterizarla a través de determinar la relación de atenuación. Esto es determinar los parámetros de algún modelo empírico, clásicamente en modelo de Devine.

3.1. NORMAS DE VIBRACIONES

Los primeros cuatro efectos de las vibraciones transitorias que listamos al comienzo del capítulo 3 son normalmente agrupados para observación experimental, por ello los niveles de vibración están regulados para prevenir grietas cosméticas [6]. Evitando daños estructurales.

La principal norma de vibraciones es específicamente para construcción civil aledaña a obras de voladura, el estudio se realizó en una mina de carbón en Estados Unidos, se definió en el reporte de investigación RI8507 de la oficina de minas de EE. UU. En este reporte Siskind estudió a las grietas generadas en paredes y cielos, definiendo un ábaco, que no presentaremos por estar desactualizado y en unidades imperiales. Su umbral de daño es de 12.7[ms] desde 10[Hz] hasta 4[Hz] luego disminuye gradualmente hasta un mínimo de 5[mm/s] cuando llega a 1[Hz]. A pesar de ser un estudio para las obras civiles residenciales, este umbral sigue siendo ampliamente utilizado como norma de daño a macizo rocoso en campo lejano.

Actualmente en Chile, las vibraciones a obras civiles están reguladas por la Norma Chilena 3577, puede resumirse en la Tabla 2, si bien tiene mayores alcances, no indica un umbral para daño en macizo rocoso.

Tabla 2: Resumen de NCh 3577, velocidad máxima de partícula permitida según tipo de estructura.

		Frecuencia principal [Hz]		
		< 10	10 - 50	50 - 100
Tipo	Estructura	Velocidad de partícula máxima [mm/s]		
i	Estructura pesada (Acero y hormigón armado)	20	20 - 40	40 - 50
ii	Estructura residencial (Albañilería, hormigón con cadenas, paneles de madera reforzado)	5	5 - 15	15 - 20
iii	Estructura liviana (Adobe, paneles de madera sin refuerzo), estructuras de valor arqueológico o histórico, estructuras de emergencia.	3	3 - 8	8 - 10

Como quedó expuesto, las normas de vibraciones van dirigidas hacia las obras civiles, si bien estas tienen importancia, en la gran minería del cobre a cielo abierto, el estado y estabilidad de la mina también es crítico. Estas estructuras en el macizo rocoso, construidas por voladura y maquinaria pesada deben muchas veces ser funcionales por décadas. A ello se debe el interés de realizar campañas vibrográficas. El objetivo de estas campañas es “conocer la ley de propagación de las vibraciones para determinar después la carga máxima operante para una distancia dada y para un criterio de prevención adoptado” [8].

Respecto al criterio de prevención, las normas no entregan un valor para daño al macizo rocoso. Tenemos valores de literatura para macizos rocosos, que no se consideran norma, en el popular manual de Lopez Jimeno dan como umbral de daño 250[mm/s], bajo este indica no haber peligro en roca sana [8]. Esta regla general no es de gran utilidad, por otra parte, un criterio más sensible es la velocidad crítica que induce el desplazamiento de bloques. En el manual de monitoreo de vibraciones de ENAEX se introduce la ecuación de Wong & Pang, Ecuación 1, esta entrega una velocidad máxima crítica que puede inducir el deslizamiento de bloques [2], utiliza F_s el factor de seguridad estático que comúnmente va desde 1.0 hasta 1.1, el desplazamiento máximo δ_p va desde 5 hasta 10[mm] según mediciones empíricas, β es el ángulo del plano de falla y g es la aceleración de gravedad.

$$V_{crítica} = \sqrt{2 * g * \delta_p * \sin(\beta) * \left(\frac{F_s}{2} + \frac{1}{2 * F_s} - 1\right)}$$

Ecuación 1: Criterio Wong & Pang, velocidad de partícula crítica para el desplazamiento de bloques.

En la Tabla 3 se presentan valores de $V_{crítica}$ considerando múltiples factores de seguridad y ángulos de plano de falla, asumiendo un desplazamiento máximo de 5[mm]. Es evidente que este criterio considera valores de velocidad máxima de partícula sustancialmente menores a las guías generales para macizos rocosos.

Tabla 3: Valores de velocidad crítica para dos factores de seguridad estáticos dados [4].

$F_s = 1.04$		$F_s = 1.08$	
β°	$V_{crítica}$ [mm/s]	β°	$V_{crítica}$ [mm/s]
30	7.5	30	29.0
35	8.6	35	33.3
40	9.7	40	37.3
45	10.7	45	41.1
50	11.5	50	44.5
55	12.4	55	47.6
60	13.1	60	50.3
65	13.7	65	52.6
70	14.2	70	54.6

Autores como Bernd Müller, indican que este criterio de daño debe ser mucho más específico para cada caso en particular, para ello propone medir directamente la deformación en zonas de interés a proteger de las vibraciones, como fallas, bloques, rampas, entre otros [7]. Propone para ello el uso de “rejilla de Bragg de fibra”, un segmento de fibra óptica que se calibra para medir deformación en terreno.

Si bien se puede definir una velocidad crítica de partícula $V_{crítica}$ tanto utilizando lineamientos generales, aproximaciones teóricas o midiendo la deformación en terreno, su importancia yace en que este umbral nos permite generar ábacos de diseño en base al modelo empírico calibrado. Los ábacos indican la carga máxima permitida a una distancia dada la velocidad crítica considerada.

Para el modelo de Devine al final del estudio [10] se propone la Ecuación 2 para determinar la carga máxima por retardo permitida según la distancia escalar obtenida del criterio velocidad crítica.

$$Q_s = \left(\frac{d}{d_s} \right)^2$$

Ecuación 2: Máxima carga por retardo segura dado una distancia escalar de seguridad definida.

Donde Q_s es la carga por retardo segura en [kg], d_s es la mínima distancia escalar permitida dado el criterio de velocidad crítica, tiene las unidades de $\left[\frac{m}{\sqrt{kg}}\right]$, luego d es la distancia a la cual queremos conocer la carga máxima, en unidades de [m].

4. DATOS

4.1. FASE 8 MINA ZALDÍVAR

Los datos vienen de un contexto particular, 3 geófonos automatizados instalados en Mina Zaldívar capturan las vibraciones generadas por voladuras de diversos tipos, como producción que usa una alta cantidad de explosivo por pozo; contorno, que disminuye la carga en las filas cercanas a la pared del pit; y rampa, que utiliza pozos de largo variable. Estas voladuras son llevadas a cabo en Fase 8 y Fase 9, únicas fases activas actualmente. Los datos que se utilizarán son los registrados por el geófono 3 de voladuras de producción en Fase 8, debido a que la operación está centrándose en esta fase, teniendo más voladuras anuales, que además son de mayor tamaño tonelaje.

Cada uno de estos equipos automatizados se compone de: un geófono superficial Bartec modelo MR3000BLA SYSCOM, un panel solar, baterías de larga duración e internet vía 3G. Este instrumento tiene un error asociado menor a 0.5[mm/s] según la normativa de calibración de la Sociedad Internacional de Ingenieros de Explosivos (ISEE). Los geófonos son ubicados en sectores que no se modificaran estructuralmente en el mediano plazo, se puede observar su ubicación en la Figura 1 izquierda.

La Fase 8 se compone de dos sectores, como se aprecia en la Figura 1 derecha, cada uno de estos está dividido en un sector medio y un sector duro, como se aprecia en la Figura 2. El sector duro tiene gran presencia de UGTB 8, que posee un UCS de 106 [Mpa].

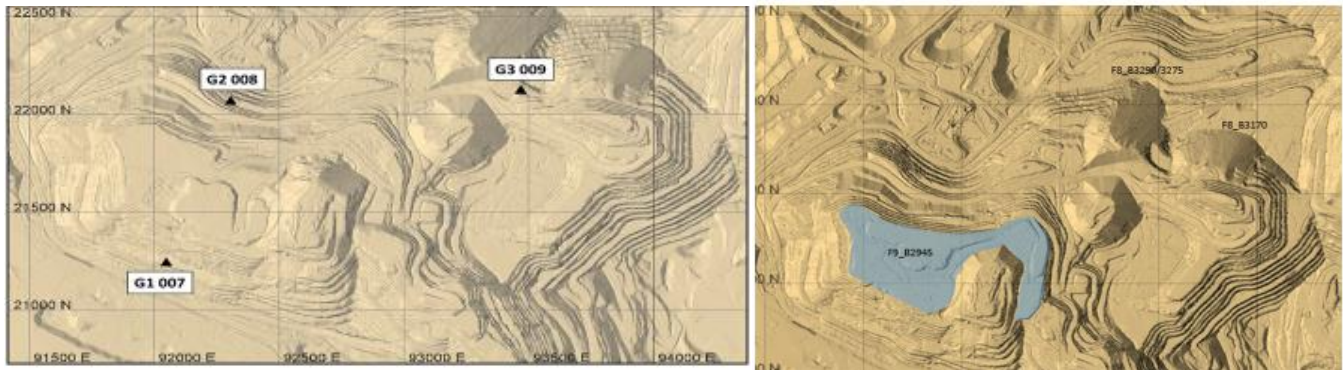


Figura 1: (Izquierda) Ubicación de los 3 geófonos automatizados en Mina Zaldívar. (Derecha) ubicación de fase 8 (zona derecha superior) y Fase 9 (zona izquierda interior).

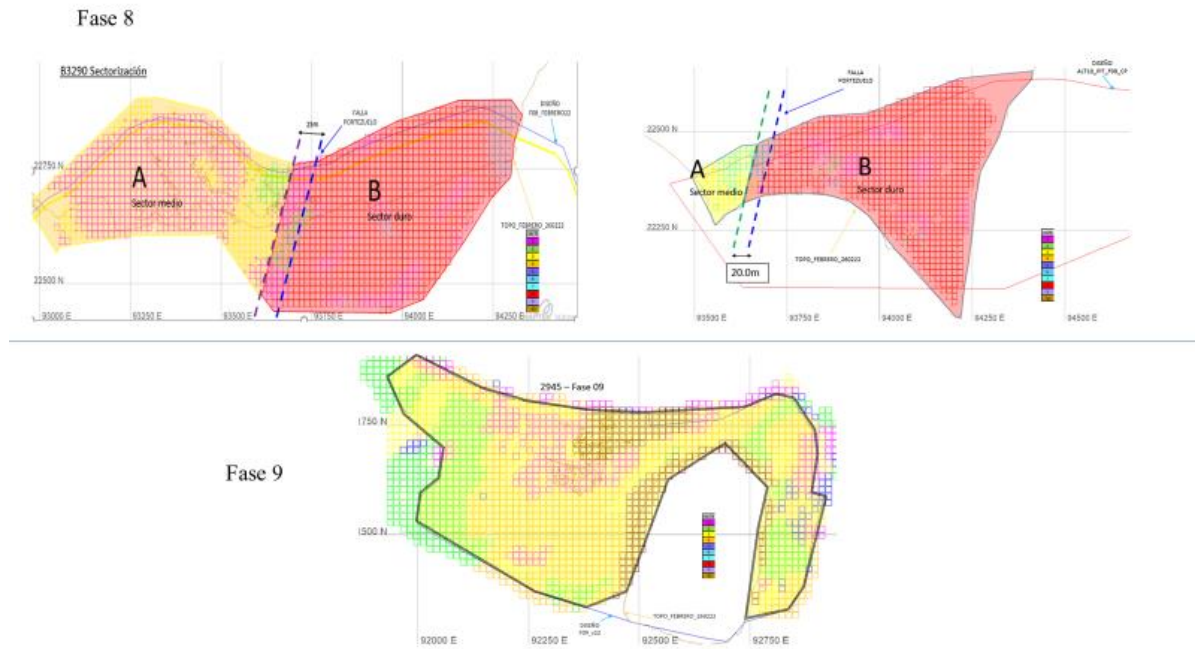


Figura 2: (Zona superior) Fase 8, compuesta de dos unidades geotécnicas de voladura, una dura (roja) y una media (amarillo). (Zona inferior) Fase 9, compuesto de material medio.

El objetivo de fragmentación de la operación es lograr un P80 de 15.7[cm] a 17.3[cm], lo que significa que el 80% en masa de los fragmentos debe tener un diámetro menor a este intervalo. Se mide a través de muestras que son tamizadas en laboratorio y análisis de imágenes directamente captadas en la pala que carga el frente fragmentado a los camiones de alto tonelaje.

El diseño geométrico de las voladuras de producción se detalla en la Tabla 4, dos diseños para Fase 8 según las propiedades mecánicas. Fase 9 también tiene dos diseños a pesar de ser considerado como sector medio, esto debido a que la carga se realiza con pala o con cargador frontal.

Tabla 4: Diseño geométrico de voladuras de producción en Fase 8 y Fase 9.

	Burden[m]	Espaciamiento[m]	Pasadura[m]	Taco[m]
F8 Sector duro	8.2	9.5	1.5	5.5
F8 Sector medio	10	11.5	1.5	5.5
F9 Carga Pala	12	14	1.5	5.5
F9 Cargador frontal	10.5	13	1.5	5.5

Los agentes de voladura utilizados en las voladuras de producción en mina Zaldívar son, Vertex, Blendex y ANFO a granel, su uso es para rocas duras a blandas respectivamente. Vertex es el explosivo con mayor energía teórica luego del ANFO, este último genera grandes cantidades de gases, siendo más adecuado para macizos fracturados y menos competentes. Vertex transforma gran parte de su energía en onda de shock la cual es adecuada para fragmentar rocas competentes. Los dos primeros son agentes de voladura en base a emulsión y ANFO. Sus características son detalladas en la Tabla 5.

Tabla 5: Características de los explosivos utilizados en voladuras Mina Zaldívar.

		Densidad[g/cc]	VOD[m/s]	Presión detonación [Mpa]	Energía [MJ/kg]	Energía relativa ANFO peso	Resistencia al agua	Diámetro Mínimo [cm]
Vertex	930	1.00 +- 5%	3500 - 5950	2.756 – 11.506	3.733	1.36	Nula	10.2
	950	1.32 +- 5%			3.507	1.28	Media	12.7
	970	1.34 +- 5%			3.322	1.21	Alta	14.0
Blendex	930	1.00 +- 5%	3500 - 5900	2.756 – 11.313	3.473	1.26	Nula	10.2
	950	1.3 +- 5%			3.247	1.18	Media	12.7
ANFO		0.77 +- 5%	3800-4100	3	3.818	X	Nula	6.4

La iniciación se realiza con detonadores electrónicos utilizando el sistema de iniciación digital DaveyTronic SP. El detonador se ubica dentro de X-Booster, alto explosivo de pentolita que entrega la energía necesaria para inducir la detonación del agente de voladura.

4.2. CONFIGURACIONES DE CARGA

Existe una amplia discusión sobre que “Carga” utilizar al momento de predecir vibraciones inducidas por voladura, los experimentos iniciales de la Oficina de Minas de EE.UU. utilizaron voladuras de un pozo, por lo que la carga es el pozo aislado. Experimentos posteriores realizados en minas y canteras buscaron modelar las vibraciones de voladura completa [10], un sistema de múltiples pozos, para ello se tienen dos aproximaciones, carga por retardo, que se define como la masa de explosivo que detona en 8[ms] [1] o carga total del sistema, que es la suma de la carga de todos los pozos.

Estudios como los dirigidos por Blair [11] proponen usar la carga total del sistema, al observar que voladuras más grandes contribuyen a un aumento de la velocidad máxima de partícula, no explicado en la carga por retardo [6]. La distancia se considera desde el collar del pozo en el caso de voladuras de pozo aislado y desde el centroide de la voladura cuando se usa carga completa del sistema.

Así se tienen 3 configuraciones de carga:

- Pozo aislado: Masa de explosivo contenido en un único pozo.
- Carga por retardo: Masa de explosivo que alcanza a detonar en 8[ms].
- Carga total: Masa de explosivo del sistema completo, suma de cada pozo que compone el sistema.

Los modelos empíricos podrían ser calibrados con cualquiera de estas configuraciones, la metodología a proponer debe lograr definir cuál de ellas logra un mejor rendimiento predictivo.

Las voladuras registradas en Mina Zaldívar implementaron un protocolo de pozo aislado, este define que el primer pozo debe tener un retardo de 200[ms] respecto a la salida del segundo pozo, por ello tenemos registro de vibraciones tanto de voladuras completas, como de pozo aislado. La base de datos de carga por retardo se construye bajo el criterio de 8[ms].

4.3. BASE DE DATOS

La metodología para determinar en qué configuración de carga y en qué modelo empírico o de aprendizaje de máquina se logra un mayor rendimiento predictivo, se aplicará a una base de datos de voladuras de producción realizadas en Fase 8, registrado con el geófono 3.

La base de datos consta de una colección de mediciones de velocidad de partícula en [mm/s] en tres direcciones, debido a que los geófonos son triaxiales, capturado desde el 06/03/21 hasta el 05/03/22 en el contexto previamente descrito, monitoreo constante. De este registro se obtiene un dato por dirección que es el valor absoluto del máximo del registro, V_{max_V} , V_{max_T} , V_{max_L} correspondientes a la dirección vertical, transversal y longitudinal. Utilizamos como parámetro de velocidad el vector suma, que llamamos simplemente V_{max} , este queda definido en la Ecuación 3.

$$V_{max} = \sqrt{V_{max_V}^2 + V_{max_T}^2 + V_{max_L}^2} \quad [\text{mm/s}]$$

Ecuación 3: Vector suma de la velocidad de partícula de un geófono triaxial.

Inicialmente la base de datos no contiene la “Distancia”, que junto a la “Carga” son los dos atributos de los modelos predictivos. La base de datos tiene las coordenadas del pozo aislado o del punto representativo de la voladura completa, por ello se solicitan las coordenadas del geófono 3, con lo que podemos calcular la distancia a través de la Ecuación 4. Donde $G_{E,N,C}$ y $V_{E,N,C}$ son respectivamente las coordenadas Este, Norte, Cota de geófono y voladura.

$$d = \sqrt{(G_E - V_E)^2 + (G_N - V_N)^2 + (G_C - V_C)^2} \quad [\text{m}]$$

Ecuación 4: Cálculo de la distancia en base a coordenadas de geófono y voladura.

De esta forma la base de datos contiene la velocidad máxima en [mm/s], la carga en [kg] y la distancia en [m]. Para carga total tenemos 50 datos, carga pozo aislado 27 datos, carga por retardo 22 datos.

5. METODOLOGÍA

Se estudia la estadística descriptiva para realizar análisis de datos:

- Calcular la estadística descriptiva de la carga, distancia y velocidad máxima de vibración. Para cada conjunto de datos.
- Estudiar las distancias a las que fueron registradas las vibraciones y su impacto en el modelamiento del campo lejano.
- Determinar si los registros de pozo aislado sirven para predecir voladura completa utilizando parámetros de estadística descriptiva.

5.1. MODELOS EMPÍRICOS

Actualmente se han instalado geófonos fijos, que monitorean las voladuras de forma constante, aumentando la cantidad de datos, pero limitando fuertemente la distribución espacial de los mismos. Para calibrar un modelo los datos deben encontrarse en un rango de interés, lo que idealmente será desde que comienza el campo lejano, hasta que las vibraciones tengan una magnitud desestimable, normalmente se considera menor a 1[mm/s].

Los mecanismos por los cuales la onda mecánica disminuye la magnitud de su velocidad son dos, los que se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6: Mecanismos de atenuación de la velocidad de vibración [8].

	Fundamento	Forma matemática	Parámetro
Atenuación geométrica	La densidad de energía en la propagación de un pulso, disminuye conforme las ondas afectan a mayores volúmenes de roca.	$\frac{1}{d^n}$	Donde d es la distancia desde un punto representativo de la voladura hasta el geófono. n es la atenuación característica del macizo rocoso.
Amortización inelástica	Los macizos rocosos no constituyen para la propagación de las vibraciones un medio elástico, isotrópico y homogéneo, hay numerosos efectos inelásticos.	$e^{\alpha*d}$	Donde α es el factor de atenuación elástica.

En base a estos mecanismos que explican la disminución de la magnitud de la velocidad respecto a la distancia, los cuales se fundamentan en datos tanto de voladuras como de explosiones de armamento bélico, se han propuesto múltiples modelos empíricos. Estos buscan ajustar los datos a su ecuación para obtener un modelo predictivo con constantes calibradas que son representativas del macizo rocoso o suelo donde son captados los datos.

Los datos obtenidos suelen ser ajustados al modelo de Devine para luego determinar una distancia escalar límite de diseño, esto puede ser con carga de pozo aislado, carga por retardo o carga total del sistema. En esta memoria se estudiarán los principales modelos que abarcan uno o ambos mecanismos, y tienen distinto origen, desde canteras hasta armamento, para determinar cual tiene un mayor rendimiento predictivo en Fase 8. Estos son resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7: Resumen de modelos empíricos para predecir la máxima velocidad de partícula en el campo lejano.

Modelo	Fundamento	Bibliografía	Forma matemática	Parámetros
Modelo general	Estudio de voladuras de un solo pozo, aunque luego ha sido utilizado para voladuras de múltiples pozos. Es el más simple de los modelos	Langefors, U., & Kihlström, B. (1963). The modern technique of rock blasting. Wiley.	$V_{max} = k * (d)^{-\beta}$	d [m] k, β , parámetros a calibrar.
Modelo regresión general	Basado en estudio de correlación donde se consigue un dato por voladura en cantera. Utilizado tanto para pozo aislado como para carga por retardo.	U.S. Bureau of Mines "Vibrations from blasting in Iowa Limestone" 1963	$V_{max} = k * (d)^{-\beta} * (Q)^n$	d [m] Q [kg] k, β, n , parámetros a calibrar.
Modelo de Devine	Estudio de 39 voladuras en 5 canteras, distancia de registro 44[m] a 966[m]. Carga por pozo 4[kg] a 680[kg]. Utilizado tanto para carga completa como para carga por retardo.	U.S. Bureau of Mines "Effect of charge Weight on vibration levels from quarry blasting" 1962	$V_{max} = k * \left(\frac{d}{\sqrt{Q}}\right)^{-\beta}$	d [m] Q [kg] k, β , parámetros a calibrar.
Modelo de Ghosh	Incluye un parámetro exponencial para modelar la pérdida de energía por efectos inelásticos.	Ghosh, A.K. (1968). A study of the inelastic properties of rocks and its application in the prediction of blasting vibrations. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Mining Technology.	$V_{max} = k * \left(\frac{d}{\sqrt{Q}}\right)^{-\beta} * e^{\alpha * d}$	d [m] Q [kg] k, β, α parámetros a calibrar.
Modelo de Drake	Originalmente creado para modelar vibraciones inducidas por explosivos con fines bélicos, derivado de la teoría Pi Buckingham.	Drake, J. L., & Little Jr, C. D. (1983). Ground shock from penetrating conventional weapons. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS.	$V_{max} = f * A * B^{-\beta} * \left(\frac{d}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-\beta}$	d [m] Q [kg] f factor de acoplamiento [adimensional] A, B, β , parámetros a calibrar.

5.2. MODELOS DE APRENDIZAJE DE MÁQUINA

Respecto al Aprendizaje de máquina, debido a que existen los datos etiquetados, es un problema de aprendizaje supervisado. La variable de salida es un número continuo por lo que es un problema de regresión.

Los algoritmos que se entrenan, validan (k-grupos) y testean (discretamente) para comparar su desempeño prediciendo, son:

- Algoritmo de regresión lineal: Lineal, Interacción lineal.
- Algoritmo de soporte de vectores: SVM lineal, SVM cuadrático.
- Algoritmo proceso de regresión gaussiano: Racional cuadrático, Cuadrático exponencial.

La elección de estos se basa en probar tanto algoritmos lineales como no lineales. Los no lineales son los algoritmos Proceso de regresión gaussiano y SVM cuadrático.

“El proceso de regresión gaussiano es una aproximación Bayesiana no paramétrica” [12]. Su principal suposición es que las variables tienen una distribución gaussiana, de no cumplirse, deben normalizarse los datos antes de aplicar este algoritmo.

Está fuertemente controlado por el kernel $k(x)$, este puede ser interpretado como una medida de la similitud entre la matriz de atributos y el valor objetivo a predecir. El modelo GPR explica las respuestas introduciendo variables latentes $f(x_i), i = 1, 2, \dots, n$ desde un proceso gaussiano y funciones de base explícitas h . El kernel captura la suavidad de la respuesta y las funciones base proyectan las entradas x . puede representarse de forma vectorial como la Ecuación 5.

$$P(y|f, X) \sim N(y|H\beta + f, \sigma^2 I)$$

Ecuación 5: Modelo GPR en forma vectorial.

Donde y es la variable a predecir, X en la matriz con los atributos, H es la matriz con las funciones base explícitas h , f son las variables latentes, I es la matriz identidad. El algoritmo determina β que es la función base de coeficientes y la varianza ruido σ^2 .

Los dos algoritmos GPR a utilizar se diferencian por su kernel, que estudia la correlación como una medida de la distancia en el espacio. Ecuación 6 para Kernel racional cuadrático y Ecuación 7 para Kernel exponencial cuadrático.

$$k(x, x') = \sigma^2 \left(1 + \frac{\|x - x'\|^2}{2\alpha l^2} \right)^{-\alpha}$$

Ecuación 6: Kernel racional cuadrático.

$$k(x, x') = \sigma^2 e^{\left(1 + \frac{\|x - x'\|^2}{2\alpha l^2}\right)^{-\alpha}}$$

Ecuación 7: Kernel exponencial cuadrático.

Donde l es el parámetro escala de longitud, determina el largo de los “cambios” en la función, α determina la ponderación relativa de las variaciones. Siendo x los valores de entrada y x' los valores de salida.

Si bien su ventaja es que puede modelar comportamientos complejos no lineales, es una herramienta difícil de interpretar.

Los algoritmos de regresión lineal se aplican para modelar la relación lineal de la variable respuesta respecto a los atributos. El algoritmo “lineal” busca ajustar una línea recta a los datos, se representa como la Ecuación 8. Donde y es la variable respuesta, x_1, x_2 son los atributos, $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ son los coeficientes a calibrar del modelo, ε es el término del error. Se busca minimizar la suma de los errores cuadrados.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \varepsilon$$

Ecuación 8: forma de la regresión lineal.

El algoritmo “interacción lineal” es muy similar, pero incluye las interacciones de los predictores, como se observa en la Ecuación 9.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_1 * x_2 + \varepsilon$$

Ecuación 9: forma de regresión lineal con interacciones.

El algoritmo de soporte de vectores es un algoritmo de aprendizaje supervisado utilizado para clasificación y regresión. La idea principal es encontrar un hiperplano que pase lo más cerca posible de los datos. Los dos algoritmos que se proponen se diferencian por su función de decisión, esta se utiliza para definir el hiperplano.

SVM lineal tiene la forma general de la Ecuación 10. Donde w es el vector de pesos y b es el sesgo. Con el objetivo de minimizar el error de predicción y al mismo tiempo mantener la complejidad de la función.

$$f(x) = w^T x + b$$

Ecuación 10: Forma general SVM lineal.

Este algoritmo trabaja con una medida de cuánto error hay entre la predicción y los valores reales, llamada costo. Definida en la Ecuación 11. Donde C es un hiperparámetro que controla la compensación entre la complejidad y la capacidad de generalización, $f(x)$ es la predicción e y es el valor real.

$$Costo = C * \sum |f(x) - y| + \frac{1}{2} * ||w||^2$$

Ecuación 11: Función costo para SVM lineal.

SVM cuadrático tiene la forma general de la Ecuación 12. Donde α_i son los coeficientes de Lagrange que utilizados para resolver el problema de optimización que surge al entrenar SVM cuadrático. $K(x, x_i)$ es el Kernel cuadrático, definido en la Ecuación 13, mide la similitud entre dos vectores, b es el sesgo. Donde x e x_i son vectores y c es una constante que controla la suavidad.

$$f(x) = \sum \alpha_i * K(x, x_i) + b$$

Ecuación 12: Forma general SVM cuadrático.

$$K(x, x_i) = (x * x_i + c)^2$$

Ecuación 13: Kernel utilizado en SVM cuadrático.

5.3. CALIBRACIÓN

- Realizar calibración de los modelos empíricos, calibrando parámetros y determinando los valores de R^2 y RMSE (Coeficiente de determinación y Raíz del error cuadrático promedio).
- Determinar si los datos se distribuyen de forma normal o no usando el test Shapiro-Wilk.
- Si se distribuyen normal utilizar la distribución t-student para determinar los intervalos de confianza 95% para cada parámetro calibrado y calculados como R^2 , RMSE. Si no son normales utilizar la técnica Bootstrap con 1000 iteraciones para determinar los intervalos de confianza de forma no paramétrica.

Para realizar la calibración se utiliza el método de mínimos cuadrados no lineales, debido a que los modelos empíricos son ecuaciones no lineales, este es un método iterativo que ajusta los valores de los parámetros para reducir la suma de los errores cuadráticos y encontrar los valores óptimos. De forma que se ajusta una superficie que es gobernada por el modelo empírico, a los datos de calibración como se observa en la Figura 3.

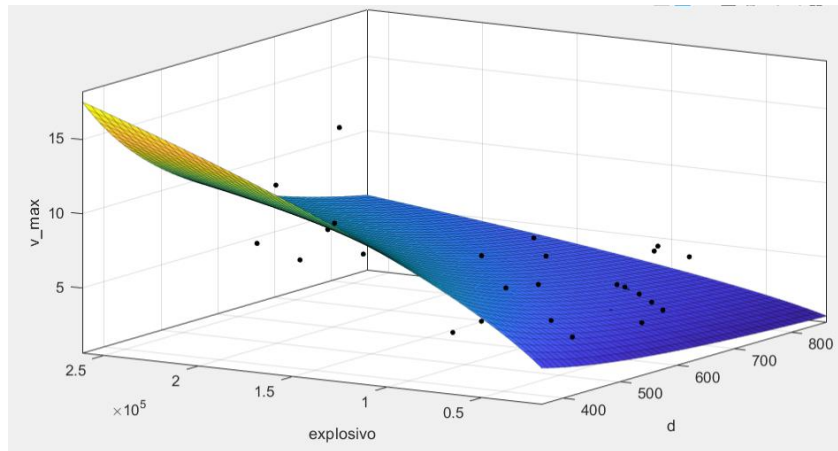


Figura 3: Ajuste de la superficie modelada por Devine a los datos medidos en Fase 8 por el Geófono 3.

Los parámetros R^2 y RMSE de calibración, no son indicadores del rendimiento predictivo, ya que podría haber un sobre ajuste, entregando excelentes resultados en calibración, pero un bajo rendimiento en validación. Por ello estos deben ser comparados con lo obtenido en la validación.

Los intervalos de confianza permitirán conocer el ancho de la banda 95% de confianza dentro de la cual se encuentra el valor real. Esto proporciona una medida de la incertidumbre asociada a la estimación puntual. Mientras más estrecho sea el intervalo de confianza, habrá menos incertidumbre asociada a la predicción.

5.4. VALIDACIÓN

- Realizar validación cruzada de 5 grupos, determinando RMSE y R^2 de validación.

La validación cruzada K-grupos es elegida debido a la limitada cantidad de datos, separar un set de datos para validación y otro para testeo, disminuiría fuertemente los datos para calibración. Esta técnica de validación utiliza los datos de calibración, separándolos en K-grupos, realizando un proceso iterativo de calibrar el modelo dejando un grupo de control fuera de la calibración para luego predecir este grupo, así K veces, informando los valores promedio obtenidos.

Es importante comprender que “la validación cruzada típicamente solo estima bien el error esperado de predicción” [13]. No permite un análisis más detallado del desempeño.

4-fold validation (k=4)



Figura 4: Diagrama de validación cruzada 4-Grupos.

5.5. TESTEO

- Estudiar el rendimiento de los modelos predictivos a través de un testeo discretizado, donde la variable objetivo V_{max} , es discretizada con un ancho de 3[mm/s], calculando el parámetro “Precisión”.

Para esto se utiliza el set de datos de testeo, que corresponde al 30% de los datos iniciales seleccionados de forma aleatoria, los cuales no son utilizados ni en calibración ni validación. Esto permite realizar una evaluación objetiva del rendimiento predictivo del modelo.

Se discretiza la variable respuesta para realizar una evaluación del rendimiento predictivo aterrizado al caso de vibraciones inducidas en el campo lejano. Luego de observar las normas de vibraciones y consultar con expertos, se determina que un ancho de clase de 3[mm/s] es suficiente para relacionar vibraciones a daño observado en campo o medido con instrumentación. Cada categoría incluye su extremo izquierdo y excluye su extremo derecho para que ninguna predicción caiga en dos categorías en caso de estar en un límite.

Contabilizando los aciertos y fallos al predecir la clase se define el parámetro “Precisión”, definido como las predicciones realizadas en la categoría correcta dividido las predicciones totales, siendo 100% un modelo que predice todas las veces en la categoría acertada.

Además, se define una variable binaria llamada “Distancia > 1” que puede ser “Sí” o “No”, como se observa en la Figura 5, esta variable binaria es “No” si ninguna de las predicciones se desvía más de una categoría, por ejemplo si el valor medido pertenece a clase 2, el modelo podría predecir que el valor corresponde a la clase 1 o clase 3 (flechas rojas en Figura 5) por lo que la distancia no sería mayor a 1, en efecto tendría el valor “No”. Si el modelo predice que el valor medido pertenece a clase 4 siendo realmente de clase 2, la variable binaria tendrá el valor “Sí”. Esto se define porque se considera que un modelo predictivo que tiene errores de predicción mayor a una categoría, no es seguro. De forma que los modelos con valor Si, serán descartados.

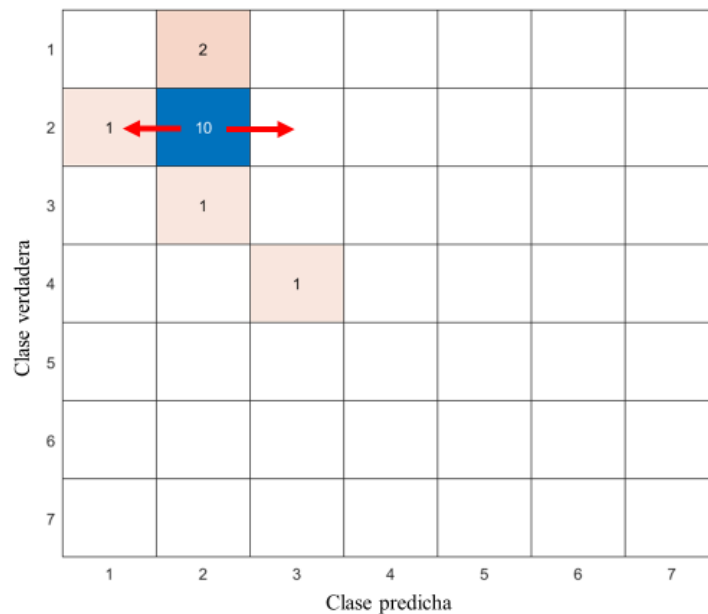


Figura 5: Matriz discreta para la variable objetivo, velocidad máxima de partícula.

6. RESULTADOS

Respecto a la distancia de registro, como se nombró en antecedentes, se considera campo lejano desde 5 veces el largo de la carga, en mina Zaldívar la carga tiene un largo de diseño de 11[m], por lo que el campo lejano va desde los 55[m] hasta que las vibraciones tienen una magnitud despreciable para los fines de prever daño al macizo o deslizamiento de bloques.

Debido a que las vibraciones tienen una magnitud de velocidad inversamente proporcional a la distancia, la zona crítica para estudiar el daño al macizo rocoso será la zona más cercana al límite con el campo cercano, ya que ahí se encuentran las vibraciones más altas. Por otra parte, en el caso de controlar las vibraciones inducidas en un bloque que puede fallar, la importancia es monitorear el punto donde se encuentra este o un rango que incluya la distancia a la que se encuentra el bloque desde la fase en la que ocurren las voladuras.

En la Figura 6 se observa en azul el intervalo de registro de distancia del geófono y las vibraciones esperadas en base al modelo de Ghosh ajustado a este conjunto de datos. Los primeros 55[m] (en amarillo) pertenecen al campo cercano, de esta forma no se registra la zona sin colorear, que es la zona de mayores magnitudes de vibraciones.

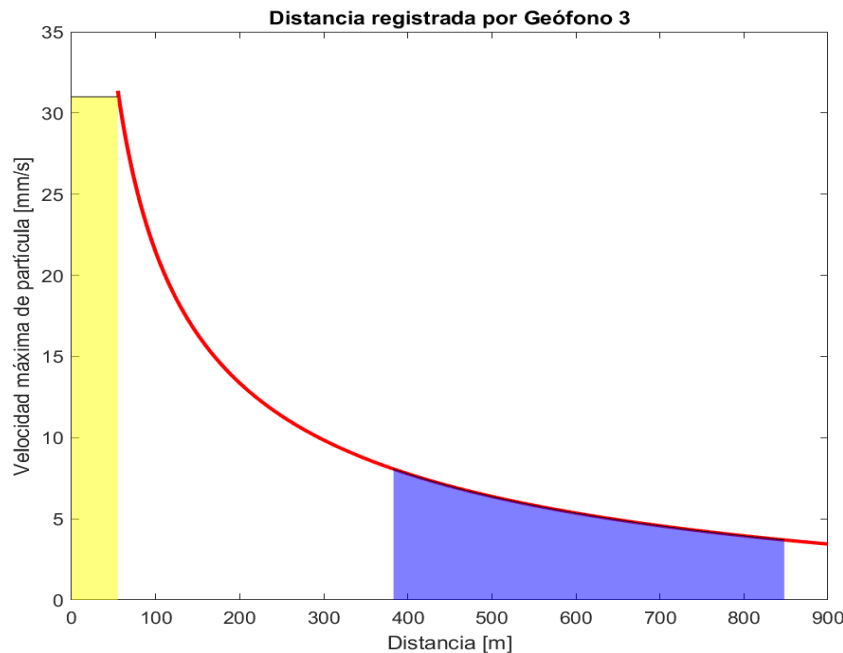


Figura 6: Distancia no registrada por geófono de vibraciones campo lejano en celeste, distancia registrada entre lo coloreado.

Si bien las predicciones de la extrapolación son subestimadas para la primera zona del campo lejano, ya que el aumento de la velocidad de vibraciones es exponencial y en los primeros metros del campo lejano se pueden alcanzar valores del orden de 100[mm/s], este es un ejemplo esclarecedor respecto a la distancia de registro debido a la posición del geófono. Los geófonos fueron posicionados en rampas y caminos que no se modificarán en el largo plazo, pero estos no están registrando la zona crítica del campo lejano. La máxima vibración de partícula registrado por geófono fue de 17.3 [mm/s], superando el umbral de daño a obras civiles 12 [mm/s], pero siendo relativamente bajo considerando que en el campo cercano se registran velocidades del orden de 1000 [mm/s].

De esta forma la ubicación del geófono no es trivial, debido a que el instrumento tiene limitaciones técnicas, magnitud máxima de 250 [mm/s] y frecuencias 1-350 [Hz]. Para determinar si es posible medir desde el comienzo del campo lejano, se recomienda:

- Definir una dirección de estudio respecto a la fase (norte, sur, este, oeste), esta sería la dirección en la que queremos posicionar el geófono.
- Trazar una recta perpendicular a la dirección seleccionada, que llamaremos “límite”, alejada de la fase en la misma dirección, luego determinar el punto perteneciente a la fase más cercano al límite. trazar una línea desde este punto en la dirección de estudio que mida 55 [m].
- Trasladar la línea límite hasta unirse con la recta de 55[m] que se origina en el punto más cercano de la fase a la recta límite.
- Utilizar una voladura de producción estándar de la operación para registrar velocidad de partícula. Ubicando un geófono superficial donde la recta que pasa por el punto representativo de la voladura, forma un ángulo recto con el límite.
- Posicionar un segundo geófono 100 metros alejado del geófono 1 en la misma línea que pasa perpendicular por el límite.

A modo de ejemplo se muestra en la Figura 7 el procedimiento en Fase 9. Se define que la dirección de estudio es el norte, se traza el límite, línea negra, para encontrar el punto de la fase más cercano al límite (inicio de la recta azul). Desde este punto se traza la recta azul, que mide 55[m], su extensión es perpendicular con la recta límite. Se traslada el límite hasta tener contacto con la recta azul. De esta forma aseguramos que ninguna voladura (estrella) realizada en Fase 9 estará a menos de 55[m] de un geófono posicionado en la recta límite.

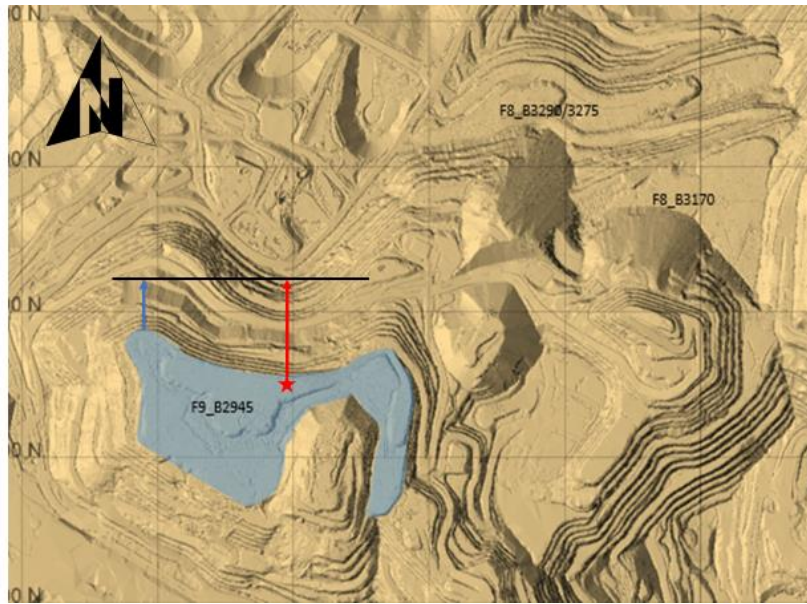


Figura 7: Ejemplo del procedimiento de posicionamiento de geófono, no está a escala.

El registro velocidad de partícula vs tiempo del geófono en la recta límite y del posicionado a 100[m] de este, nos permitirán determinar la velocidad máxima y la frecuencia dominante en ambos puntos. Con esto podremos determinar una distancia segura para ubicar el geófono a través de interpolación, donde el geófono funcione correctamente respecto a la magnitud máxima que puede registrar y en términos de frecuencia, ya que esta última puede ser determinada del registro usando la transformada rápida de Fourier. Se recomienda usar el geófono portátil Minimate pro 6 de Instantel, ya que registra hasta 254 [mm/s] en el mismo rango de frecuencias que el equipo Bartec utilizado en el sistema de geófonos superficiales fijos.

Esto permitirá mover la zona de registro de la Figura 3 hacia la izquierda, accediendo a la zona de alta magnitud de vibraciones.

6.1. CASO POZO AISLADO

Se utiliza la estadística descriptiva de los datos de calibración, en particular la mediana como medida representativa de la tendencia central y el máximo, para comparar las mediciones realizadas por cada geófono tanto de pozo aislado, como de voladura completa. Se confecciona la Figura 8 para observar el factor de aumento que se calcula como el valor de voladura completa dividido el valor de pozo aislado. El aumento en la magnitud de la velocidad máxima se debe a la interacción constructiva de onda dado los cortos tiempos inter-pozo, que van desde 5[ms] hasta 10[ms].

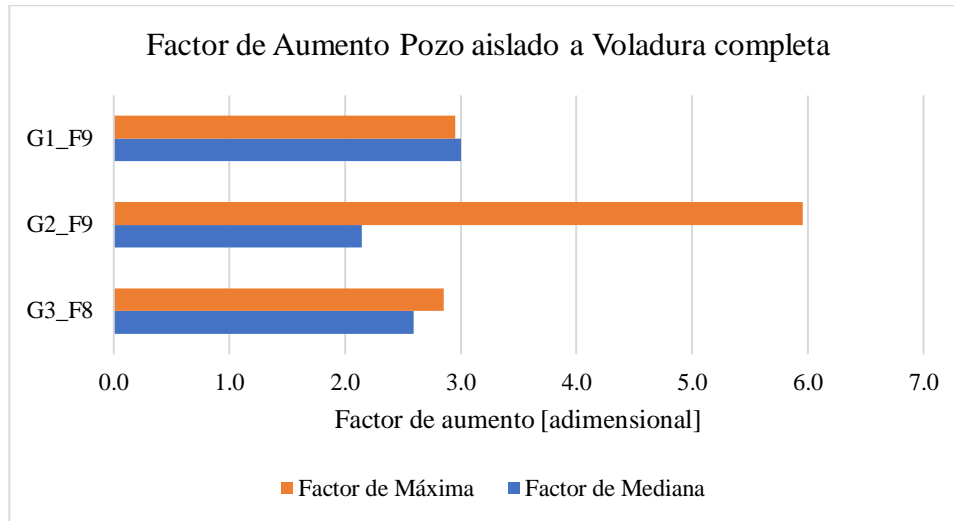


Figura 8: Factor de aumento de la mediana y el máximo al comparar vibraciones de pozo aislado respecto a las vibraciones de voladura de sistema completo.

En Fase 8, pozo aislado genera una velocidad mediana de 1.5[mm/s], mientras que el sistema completo genera una velocidad mediana de 4.1[mm], aumentando en un factor de 2.7. Queda en evidencia al observar la media y la máxima de velocidad de vibraciones de cada caso, que no es adecuado utilizar registros de pozo aislado para predecir vibraciones inducidas por sistema completo, debido a que un modelo entrenado con información de pozo aislado dará predicciones sustancialmente menores que las de voladura completa. Debido a que las vibraciones registradas para pozo aislado son considerablemente menores.

Por ello no se realiza la calibración, validación y testeo del caso pozo aislado, ya que entregará un modelo calibrado que subestima las vibraciones de sistema de voladura multi-pozo (completa) por un factor de dos o más.

6.2. CASO CARGA POR RETARDO

6.2.1. CALIBRACIÓN

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la calibración de los modelos en la configuración de carga por retardo. La forma matemática de cada modelo puede consultarse en la Tabla 7.

Tabla 8: Calibración de modelos con carga por retardo, R^2 es el coeficiente de determinación, RMSE es la raíz del error cuadrático medio.

Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Parámetros calibrados	$k = 2.877 \cdot 10^7$	$k = 1.36 \cdot 10^7$	$k = 1101$	$k = 80.55$
	$\beta = 2.44$	$\beta = 2.43$	$\beta = 1.81$	$\beta = 0.65$
		$n = 0.101$		$\alpha = -0.001273$
R^2	0.47	0.48	0.50	0.34
RMSE	2.7	2.7	3.1	2.9

El modelo de regresión general y el modelo general logran explicar una variabilidad similar y tienen el menor error promedio, sin embargo, la calibración no entrega información respecto al rendimiento predictivo.

Se presentan en la Tabla 9 los intervalos 95% confianza obtuvimos mediante Bootstrap con 1000 iteraciones. Son el modelo general y el modelo de Ghosh los que tienen una menor incertidumbre asociado al error promedio y al coeficiente de determinación.

Tabla 9: Resultados intervalos de confianza mediante Bootstrap para configuración de carga por retardo.

	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Bootstrap 1000 iteraciones	Parámetros calibrados	$k = [30.7, 9353640237.0]$	$k = [2.5, 2296226623.4]$	$k = [52.3, 447609.4]$	$k = [60.86, 100.5]$
		$\beta = [0.30, 3.39]$	$\beta = [0.19, 3.18]$	$\beta = [0.36, 1.90]$	$\beta = 0.65$
			$n = [-0.41, 1.10]$		$\alpha = -0.001273$
	RMSE 95%	[0.39, 8.52]	[0.29, 14.84]	[0.50, 12.68]	[0.56, 12.16]
	R^2 promedio	0.37	0.32	0.37	0.29
	R^2 95%	[0, 0.47]	[0, 0.47]	[0, 0.50]	[0.11, 0.34]

6.2.2. VALIDACIÓN

Los resultados de la validación cruzada K-grupos son presentados en la Tabla 10. Respecto a la calibración los coeficientes se mantuvieron similares excepto el modelo de Ghosh que tuvo una baja importante en coeficiente de determinación y también obtuvo el menor error promedio. Por lo que en promedio es el modelo que mejor predice. Aún es necesario el testeo para estudiar la generalización que tiene este modelo al enfrentarse a nuevos datos.

Tabla 10: Coeficiente de determinación y error cuadrático promedio de validación cruzada para configuración de carga por retardo.

Validación	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Carga por retardo	R2	0.43	0.46	0.48	0.29
	RMSE	3.4	3.6	3.2	2.7

6.2.3. TESTEO

En la Tabla 11 se presentan los resultados del testeo discretizado. Solo un modelo cumple con la condición binaria que no predecir con un error mayor a una clase, además es este mismo modelo, Ghosh, el que logra la mejor precisión. Por lo que, en la configuración de carga por retardo, la metodología permitió identificar el modelo de Ghosh como el mejor modelo predictivo, por ser consistente sin desviarse mas de una clase en sus predicciones y por lograr una precisión del 57%.

Tabla 11: Resultados de testeo discretizado para modelos con carga por retardo.

Testeo	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
M. Discretizada	Precisión	29%	43%	29%	57%
	Distancia > 1	Sí	Sí	Sí	No

6.3. CASO CARGA COMPLETA

6.3.1. CALIBRACIÓN

En la Tabla 12 se presentan los resultados de calibración para carga completa, en este caso es el modelo de regresión general el que logra explicar más variabilidad y tiene un menor error promedio asociado.

Tabla 12: Calibración de modelos con carga completa del sistema, R^2 es el coeficiente de determinación, RMSE es la raíz del error cuadrático medio.

Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Parámetros calibrados	$k = 4551 \cdot 10^6$	$k = 43880$	$k = 11.87$	$k = 10.45$
	$\beta = 2.16$	$\beta = 2.14$	$\beta = 1.42$	$\beta = 0.58$
		$n = 0.394$		$\alpha = -6.789 \cdot 10^{-4}$
R^2	0.44	0.62	0.54	0.43
RMSE	2.2	1.9	2.0	2.2

Se presenta en la Tabla 13 los resultados de intervalos de confianza 95% obtenidos mediante Bootstrap. El modelo de Ghosh es el que tiene menor incertidumbre asociada en el coeficiente de correlación, todos los modelos tienen una incertidumbre similar en el error promedio, solo regresión general tiene un menor intervalo.

Tabla 13: Resultados intervalos de confianza mediante Bootstrap para configuración de carga completa.

	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Bootstrap 1000 iteraciones	Parámetros calibrados	$k = [29.4, 81674 \cdot 10^4]$	$k = [1.6, 6527722.9]$	$k = [5.7, 15.5]$	$k = [9.8, 13.9]$
		$\beta = [0.29, 3.00]$	$\beta = [0.33, 2.90]$	$\beta = [0.36, 1.90]$	$\beta = 0.58$
			$n = [0.15, 0.56]$		$\alpha = -6.789 \cdot 10^{-4}$
	RMSE 95%	[0.10, 9.58]	[0.12, 7.00]	[0.12, 9.64]	[0.16, 9.16]
	R^2 promedio	0.35	0.53	0.46	0.4
	R^2 95%	[0.02, 0.44]	[0.14, 0.62]	[0.20, 0.53]	[0.28, 0.43]

6.3.2. VALIDACIÓN

Los resultados de la validación cruzada K-grupos son presentados en la Tabla 14. Respecto a la calibración, los coeficientes de determinación se mantienen similares, al igual que los errores promedio, siendo muy similares para todos los modelos. Solo regresión general presenta un mayor coeficiente de correlación respecto a los otros modelos. No queda claro cuál modelo predice mejor.

Tabla 14: Coeficiente de determinación y error cuadrático promedio de validación cruzada para configuración de carga completa.

Validación	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
Carga total	R2	0.43	0.62	0.47	0.42
	RMSE	2.2	2.1	2.2	2.1

6.3.3. TESTEO

En la tabla 15 se presentan los resultados del testeo discretizado. Dos modelos cumplen con no desviarse mas de una clase, pero de ambos claramente Ghosh es el modelo con mayor precisión. Así la metodología permite determinar que el modelo de Ghosh es el mejor modelo predictivo en la configuración de carga completa.

Tabla 15: Resultados de testeo discretizado para modelos con carga completa.

Testeo	Modelo	General	Regresión general	Devine	Ghosh
M. Discretizada	Precisión	67%	53%	67%	73%
	Distancia > 1	Sí	No	Sí	No

6.4. APRENDIZAJE DE MÁQUINA

Definido el mejor modelo en ambas aproximaciones se entrenan, validan y testean 6 algoritmos de aprendizaje de máquina, usando datos de carga total, ya que ese set logró un mejor desempeño en los modelos empíricos, se presentan los resultados en la Tabla 16. De ellos solo 3 cumplen con no desviarse más de una categoría (según lo explicado en el capítulo 5.5). De estos tres, los algoritmos de regresión de procesos gaussianos tienen valores de parámetros RMSE y R^2 similares, se selecciona GPR racional cuadrático, debido a que explica más varianza que el algoritmo cuadrado exponencial.

Si bien tanto la aplicación de aprendizaje de máquina, así como la aproximación de modelos empíricos, lograron un desempeño similar en el testeo discreto, el aprendizaje de máquina tiene una diferencia en la validación, donde el coeficiente de determinación es levemente mayor que el modelo de Ghosh.

Tabla 16: Evaluación de modelos de aprendizaje de máquina implementado en aplicación "Regression Learner" MATLAB.

	Regresión lineal			SVM		GPR	
	Modelo	Lineal	Interacciones lineales	Lineal	Cuadrático	Racional cuadrático	cuadrado exponencial
Validación 5-grupos	RMSE	2.7	2.4	2.7	2.1	2.1	2.1
	R2	0.16	0.33	0.13	0.47	0.50	0.48
Test	RMSE	1.8	1.8	1.7	1.6	1.3	1.4
	R2	0	0	0.1	0.21	0.41	0.34
Test discreto	Precisión	67%	71%	73%	67%	73%	73%
	Distancia > 1	No	Si	Si	Si	No	No

7. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

La aproximación clásica de calibrar el modelo de Devine y considerar el R^2 como una medida de la capacidad predictiva [2] no es adecuada. Para ambos tipos de carga, la calibración entrega un modelo de Devine con un coeficiente de determinación mayor al de Ghosh, 0.50 contra 0.34 en carga por retardo y 0.54 contra 0.43 en carga completa. Incluso realizar validación cruzada no fue concluyente. Por ello esta metodología de testeo discreto es una opción viable al momento de discutir el desempeño de la herramienta predictiva para campo lejano, siempre y cuando el ancho de clase se corresponda con la precisión requerida en el caso particular de estudio. Además el criterio de no desviarse más de una categoría limita el ancho de la misma. Categorías demasiado finas no cumplirían este requisito en ningún caso.

Se observa en la Figura 9 que la aproximación de carga total del sistema logró mayor precisión en todos los modelos al compararla con la aproximación clásica de carga por retardo, por lo que la carga total modela mejor el fenómeno de mayor interacción en voladuras con más pozos que discute Blair en [11].

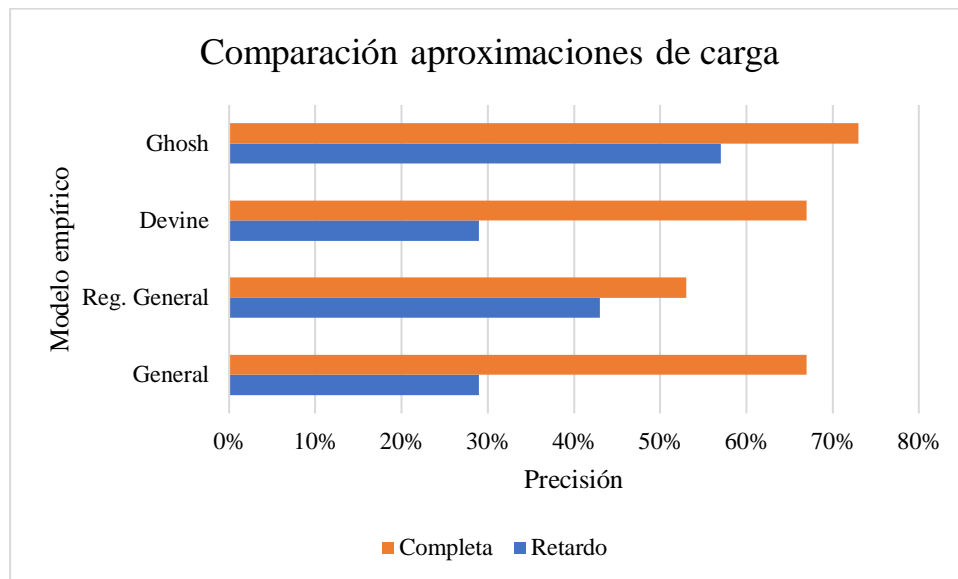


Figura 9: Precisión que logra cada modelo para las aproximaciones de carga completa y carga por retardo.

La ubicación de los geófonos debe responder directamente a los objetivos del estudio de campo lejano. Este objetivo puede ser estudiar el daño al macizo rocoso, estudiar la estabilidad de un bloque que puede fallar o estudiar los efectos sobre obras civiles (domésticas o industriales). Como en Mina Zaldívar se busca estudiar la interacción del macizo con las vibraciones generadas por voladura en campo lejano, se observa que los geófonos están posicionados demasiado lejos de las respectivas fases donde ocurren las voladuras, comenzando el registro a los 383[m] siendo que campo lejano comienza a los 55[m] desde la voladura.

Se propone una metodología simple para medir con dos geófonos superficiales móviles. El primero en el límite de ubicación del geófono en campo lejano y el segundo 100[m] alejado del primero. Así se puede realizar una interpolación que permita estimar donde puede posicionarse el geófono sin exceder sus límites técnicos.

La amortización inelástica, modelada con un α llamado factor de pérdida friccional, que es incluido en la ecuación de Ghosh, suele no ser tomado en cuenta para predecir el máximo de velocidad de vibración, se argumenta que “el factor de pérdida friccional no tiene un gran efecto en la amplitud de vibración” [2]. Sin embargo, autores como Hudaverdi (2019) indican que sí influye en el campo lejano cuando consideramos distancias mayores a 200[m] [14]. En este estudio la inclusión de este parámetro incrementó sustancialmente la precisión de las predicciones. El modelo de Ghosh es idéntico al modelo de Devine multiplicado por la exponencial de efecto inelástico, en el caso de carga por retardo, pasó a cometer errores de más de una categoría en test discreto a solo una, aumentando su precisión de 29% a 57%. De manera similar para carga completa donde aumentó la precisión de 67% a 73% en el testeo.

La aplicación “Regression Learner” tiene la limitante de no entregar intervalos de confianza, con ningún método. Estos pueden ser clave para evaluar la incertidumbre asociada a un modelo. Por lo que debe tenerse en cuenta al considerarla como una opción para la implementación de aprendizaje de máquina.

El algoritmo “Proceso de regresión gaussiana racional cuadrado” logró un desempeño similar al modelo de Ghosh utilizando carga completa. En el testeo discreto, podría considerarse levemente superior en la validación por tener un RMSE levemente menor. Esto no es suficiente para afirmar que el aprendizaje de máquina es una opción viable a los modelos empíricos, debido a que el modelo empírico es más simple e interpretable que GPR, este es un modelo probabilístico no paramétrico.

Si bien los modelos que predicen las vibraciones inducidas en campo lejano, representan un desafío en sí mismo, debido a la alta incertidumbre del fenómeno, es necesaria la determinación de una velocidad crítica, que sea un umbral de daño. Aunque existen aproximaciones teóricas, se recomienda medir deformación en terreno utilizando rejilla de Bragg de fibra [9], para lograr determinar una velocidad crítica confiable. Los esfuerzos en determinar el umbral de daño deben ser proporcional al esfuerzo invertido en el modelo predictivo, ya que solo con ambos se pueden crear ábacos de diseño, que limiten la cantidad de explosivo total o por retardo de forma tal de no superar cierto umbral en una distancia d de la voladura.

Como conclusiones se puede determinar lo siguiente:

- La aproximación clásica de calibrar el modelo de Devine o el Modelo general, interpretando R^2 como un parámetro de calidad predictiva no es concluyente. Se plantea el uso de validación cruzada, determinación de intervalos de confianza y testeo discretizado, como una aproximación sólida para evaluar modelos empíricos de campo lejano, obteniendo como mejor modelo para este caso al modelo de Ghosh con una precisión de 73% que no da predicciones que se desvíen más de una categoría.
- Las ubicaciones de los geófonos en mina Zaldívar están demasiado alejados de las fases activas, ya que su finalidad es estudiar la interacción de las ondas mecánicas con el macizo rocoso y considerando que el campo lejano comienza a los 55[m] no se registran los primeros 328[m] de este, que es donde ocurren las vibraciones de mayor magnitud. Se propone una metodología para estudiar una posición adecuada de los instrumentos sin superar sus limitaciones técnicas.

- El mecanismo de amortización inelástica tuvo gran influencia en el desempeño de los modelos predictivos, tanto al utilizar carga por retardo como carga total del sistema. Por lo que el modelo de Ghosh siempre debe considerarse como una opción al modelo de Devine en el campo lejano al aplicar esta metodología.
- Respecto al aprendizaje de máquina, el mejor desempeño lo logró algoritmo proceso de regresión gaussiana racional cuadrático, logrando un desempeño similar al modelo de Ghosh utilizando carga completa. De esta forma no presenta ventajas respecto a los modelos empíricos, debido a que estos últimos son mas simples a interpretables, por lo que no hay evidencia para afirmar que los modelos empíricos deben ser reemplazados por aprendizaje de máquina en este caso.
- La confección de ábacos de diseño que limiten la carga por retardo o la carga total del sistema solo puede realizarse si tenemos una velocidad de partícula crítica y un modelo predictivo. Por ello es menester determinar un umbral de daño, realizando medidas de deformación en terreno como se recomienda en [9] y/o calculando aproximaciones teóricas.

Finalmente, para futuras investigaciones de predicción de velocidad máxima de partícula, existe un modelo empírico llamado modelo de Müller. Es una aproximación diferente a la carga por retardo o carga completa de sistema, debido a que este asigna el máximo de velocidad de partícula de la voladura completa al pozo con máxima carga en el sistema [9]. Sus pruebas en canteras de Alemania han demostrado que el término que generan los 3 predictores que usa, logra un coeficiente de determinación respecto a la máxima velocidad de partícula que va desde 0.8 hasta 0.99 [15].

Müller (2007) propone las Ecuaciones 14 y 15, donde W_b es la carga máxima en un pozo del sistema, c_d es la velocidad de detonación medida in-situ, r es la distancia desde el geófono hasta el pozo de carga máxima. R_m , n , m son parámetros a calibrar.

$$v_{max} = R_m * (W_b * c_d * r^{-n})^m$$

*Ecuación 14: ecuación empírica que usa el momentum definido por Müller ($W_b * c_d$).*

$$v_{max} = R_m * \left(\frac{W_b * c_d^2}{2} * r^{-n} \right)^m$$

*Ecuación 15: Ecuación empírica que usa el factor energético de explosivo $\frac{W_b * c_d^2}{2}$.*

Si bien esta aproximación podría mejorar sustancialmente la predicción en el campo lejano, sería necesario realizar una medición de velocidad de detonación por cada voladura registrada. Para ello es necesario un reflectómetro de dominio de tiempo diseñado para monitorear c_d como el “ShotTrack VoD 305” el cual tiene una frecuencia de muestreo de 4[μs] y utiliza como consumible el cable coaxial estándar.

Müller justifica la importancia de la velocidad de detonación en el efecto sónico (Figura 10). Se observa una gráfica que explica cómo “el efecto sónico provee una dependencia entre fragmentación y vibraciones” [16]. Indica que existen 3 regímenes de detonación, que dependen de la magnitud de la velocidad de detonación respecto a la velocidad onda P y la velocidad de la onda S.

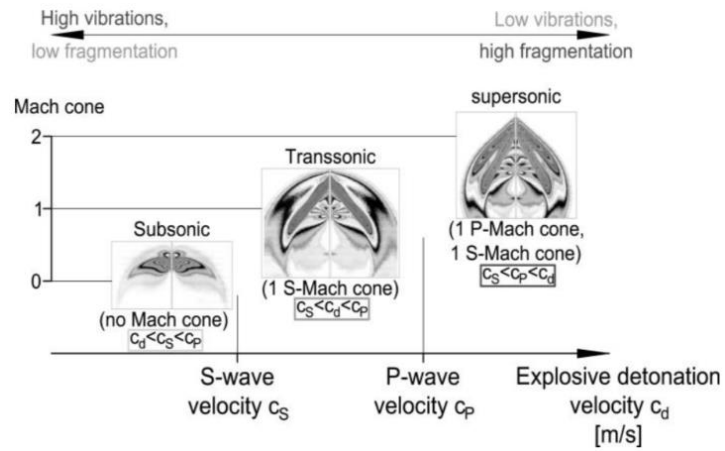


Figura 10: Diagrama del efecto sónico [13] donde c_d es la velocidad de detonación del explosivo c_s es la velocidad de la onda S en el macizo rocoso y c_p es la velocidad de la onda P en el macizo rocoso.

Si bien esto está respaldado por datos en canteras de Alemania, sería un avance en la ingeniería de explosivos confirmar o rechazar estas propuestas en la gran minería de Chile.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **International Society of Explosives Engineers**, ISEE Blasters' Handbook, Cleveland Ohio, 2011.
- [2] **Centro de Innovación Tecnológica de Explosivos ENAEX**, «Manual de Monitoreo de Vibraciones Generadas por Tronaduras, Análisis y Modelamiento,» Santiago, 2006.
- [3] **Fogelson. & Duvall**, Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations, U.S. Bureau of Mines, 1962.
- [4] **Jhon Silva Castro**, Blast vibration modelling using improved signature hole technique for bench blast, Lexington, Kentucky, 2012.
- [5] **ENAEX S.A**, Manual de Tronadura ENAEX, 2007.
- [6] **Society For Mining Metallurgy and Exploration**, SME Mining Engineering Handbook, Peter Darling, 2011.
- [7] **Mauricio Leiva**, Modelo predictivo de daño inducido por vibraciones originadas de tronadura en campo cercano y lejano en mina los pelambres, Santiago de Chile, 2021.
- [8] **Instituto geológico y minero de España**, Manual de perforación y voladura de rocas, Madrid, 1987.
- [9] **Hausmann & Müller**, «Comparison of different methods of measuring and calculating blast vibrations in rock masses,» *The 4th EFEE World Conference, Vienna.*, 2007.
- [10] **Devine & Duvall**, Effect of charge weight on vibration levels from quarry blasting, Washington: U.S. Bureau of Mines, 1966.
- [11] **D. P. Blair**, «Some problems associated with standard charge weight vibration scaling laws,» *FRABLAST '90: 3rd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pp. 149-158, 1990.
- [12] **Schulz & Speekenbrink**, «A tutorial on Gaussian process regression: Modeling, exploring and exploiting functions.,» *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 85, pp. 1-16, 2018.
- [13] **Trevor Hastie**, The elements of Statistical Learning, Standford USA: Springer, 2017.
- [14] **Hudaverdi & Akyildiz**, «Evaluation of capability of blast-induced ground vibration predictors considering measurement distance and different error measures,» *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, nº 14, pp. 1-17, 2019.
- [15] **Hausmann & Müller**, «Prediction and minimisation of vibrations during production blasts,» *Vibrations from Blasting—Spathis & Noy*, p. 47, 2009.
- [16] **Müller & Pippig**, «Modern Theory = flexible blasting = low vibrations,» *European Federation of Explosives Engineers*, pp. 69-81, 2017.