UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE

"EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL INDICADOR SÍSMICO CALOR LIBERADO"

Presentado por

ANDRÉS MARTINOLI SANTOS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor guía

DR. RODRIGO ESTAY HUIDOBRO

Profesora Correferente

DRA. CLAUDIA PAVEZ ORREGO

SEPTIEMBRE, 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por darme su apoyo en todo ámbito durante estos años, con su infinito amor y preocupación me permitieron dedicarme solo a estudiar y terminar esta carrera y siempre estuvieron ahí para darme calma y motivación para perseverar.

A Constanza, por ser el apoyo más directo y constante que tuve durante estos largos de años de carrera. Ella sabe mejor que nadie todo lo que pasamos en este camino y en ella siempre pude encontrar el apoyo cuando más lo necesité y su más sincera alegría por mí cuando me fue bien.

A mis amigos, “Los Welis”, con quienes seguimos el camino de cada uno compartiendo frustraciones e ilusiones y siendo la principal válvula de escape en momentos de estrés.

A los profesores de la Universidad que me entregaron sus experiencias y principalmente al profesor Rodrigo Estay por darme la confianza para desarrollar este trabajo y por su disposición para ayudarme cuanto lo necesité.

Finalmente, pero no menos importante, a todas las personas que conocí en estos años que con cualquier acción por pequeña que pueda parecer me brindaron una mano o me entregaron vivencias y experiencias que aportaron a mi formación como persona y profesional. A los muchachos de Dopping FC, a “Uom”, Leslie Pérez, del departamento de Minas, Claudio Rojas, y a todo el equipo de trabajo de Scarab.

RESUMEN EJECUTIVO

El manejo de la sismicidad inducida por la actividad minera extractiva es uno de los mayores problemas que enfrenta la minería. Si bien, es un problema documentado en países de gran tradición minera (Estados Unidos, Canadá, Australia y Chile) durante más de un siglo, este se ha acentuado con el tiempo debido a las profundidades que ha alcanzado la extracción mineral y, por ende, al trabajo directo sobre roca primaria. Los niveles de esfuerzos y tensiones involucrados influyen en un aumento de la posibilidad de ocurrencia de estallidos de roca y eventos sísmicos al interior de la mina provocando importantes pérdidas de vidas humanas e infraestructura.

Para enfrentar este problema se han puesto en práctica diversas medidas. Una de ellas es la implementación de indicadores sísmicos que permiten, mediante el estudio de distintos parámetros, identificar periodos en los que es más probable que ocurran eventos sísmicos de magnitudes significativas. El objetivo de este trabajo es relacionar la influencia del calor liberado, generado por la microsismicidad en la mina, con la ocurrencia de eventos sísmicos en la mina y de esta forma determinar los parámetros que permitan el mejor desempeño del indicador calor liberado.

Utilizando una base de datos de sismicidad registrada en la mina Bobrek durante un periodo de 15 meses se aplicaron dos metodologías distintas: calor emitido acumulado y bandas de alerta. Mediante estas se encontraron parámetros bajo los cuales el indicador mostró un desempeño óptimo, determinado por la maximización del PSS, identificando periodos de alerta por riesgo sísmico. Se concluyó que la metodología del calor liberado acumulado crítico se desempeñó en mejor forma que la metodología de bandas de alerta. Además, los parámetros óptimos para el funcionamiento del indicador corresponden a un calor liberado acumulado crítico $Q^* = 8.75$ [GJ], con un intervalo T de 24 horas y una magnitud crítica ${M_w}^*$= 1.5.

ABSTRACT

The effects of the induced seismicity caused by mining activities are one of the biggest problems that the mining industry faces. Although it has been documented by countries with a great mining tradition (United States, Canada, Australia and Chile) for over a century, the problem has been intensified throughout the years due to the greater depths that mineral extraction reaches, and thereby, to the work on primary rock. The stress levels and tensions involved increase the possibility of a rockburst occurrence. Seismic events inside the mine cause important losses of human lives and infrastructure damage.

To face this problem several protocols have been implemented. One of those is the implementation of seismicity indicators which allow to identify, through the study of different parameters, periods of time when it is most likely for a seismic event of considerable magnitude to occur. The objective of this work is to connect the influence of the radiated heat, generated by the microseismicity inside the mine, with the occurrence of seismic events and thus determine the parameters that allow the best performance of the radiated heat indicator.

For certain values of seismic parameters – magnitude, frictional heat and time -, the indicator should show an optimal performance, determined by maximizing the PSS value, identifying alert periods for seismic hazard. To do so, we used two different methodologies: the accumulated radiated heat and the alert strips. It was concluded that the critical accumulated radiated heat methodology performed better than the alert strips methodology. Furthermore, the optimal parameters for the operation of the indicator correspond to critical accumulated radiated heat $Q^* = 8.75$ [GJ], with a T interval of 24 hours and critical magnitude $M_w{}^*$= 1.5.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 11

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS 13

2.1 RIESGO SÍSMICO 13

2.2 SISMICIDAD INDUCIDA 14

2.3 ENERGÍA TÉRMICA DE TERREMOTOS 17

2.4 INDICADORES SÍSMICOS 20

2.5 ANÁLISIS ROC 21

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO 23

3.1.1 Mina Bobrek 23

3.1.2 Datos 28

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA 32

4.1 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO 32

4.2 BANDAS DE ALERTA 38

CAPÍTULO 5. RESULTADOS 44

5.1 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO 44

5.2 BANDAS DE ALERTA 48

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 53

6.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS 53

6.2 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO 54

6.3 BANDAS DE ALERTA 57

6.4 CONTEXTO REGIONAL 60

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS 63

CAPÍTULO 9. ANEXOS 68

9.1 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO ***T*** = 24 HORAS 68

9.2 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO ***T*** = 36 HORAS 71

9.3 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO ***T*** = 48 HORAS 74

9.4 TABLAS DE CONTINGENCIA PARÁMETROS CON MEJOR PSS 77

9.5 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA ***T*** = 24 HORAS 78

9.6 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA ***T*** = 36 HORAS 79

9.7 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA ***T*** = 48 HORAS 80

9.8 TABLA DE PORCENTAJE DE TN EN LA CANTIDAD DE ACIERTOS (TN+TP) 81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1. Seis mecanismos básicos de terremotos inducidos por minería (Hasegawa et al.,1989) 15

Figura 2.2. Matriz de confusión generada y las métricas que se pueden calcular de ella. (Fawcett, 2006) 22

Figura 3.1. Litoestratigrafía y tectónica de la USCB: 1- Serie Parálica (Misisípico Superior-Pensilvánico inferior), 2- Serie de areniscas de la Alta Silesia (Pensilvánico inferior), 3- Serie de argilitas (Pensilvánico inferior-intermedio), 4- Serie de areniscas de Cracovia (Pensilvánico intermedio), 5- Fallas importantes, 6- Cabalgamientos. (Mendecki et al., 2018) 24

Figura 3.2. Componentes básicos de un método longwall. (Sammarco et. al 1997)..... 25

Figura 3.3. Condiciones del frente de avance del panel 3 de la veta 503. Los círculos indican eventos sísmicos (el círculo amarillo indica el evento de mayor magnitud); las líneas horizontales de colores muestran el avance del frente del longwall; la escala de colores de las líneas muestra la correspondencia entre el avance del longwall y los eventos sísmicos. (Mendecki et al., 2020) 27

Figura 3.4. Histograma de los eventos sísmicos registrados entre 2009 y 2010. 28

Figura 3.5. Distribución de los eventos por día. 29

Figura 3.6. Eventos mensuales y eventos acumulados a lo largo del periodo..... 30

Figura 4.1. Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 24\ horas$..... 33

Figura 4.2. Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 36\ horas$..... 33

Figura 4.3 Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 48\ horas$..... 34

Figura 4.4. Ejemplo de la recta de $Q*$ sobre la curva de calor acumulado liberado. La recta anaranjada corresponde al calor crítico definido $Q*$ y los puntos de la curva de calor acumulado liberado que están sobre la recta definen el estado de alerta. 35

Figura 4.5. Esquema explicativo del funcionamiento del indicador utilizando la metodología de calor acumulado crítico. La curva azul, corresponde a la curva de calor liberado acumulado, Q en las T horas previas desde la ocurrencia del evento y la recta roja corresponde al calor liberado acumulado crítico, $Q*$. 36

Figura 4.6. Bandas de alerta con percentiles 95 en la banda superior y 5 en la banda inferior. 38

Figura 4.7. Bandas de alerta con percentiles 90 en la superior y 10 en la inferior. 39

Figura 4.8. Bandas de alerta con percentiles 85 en la superior y 15 en la inferior. 39

Figura 4.9. Ejemplo del estado de alerta definido por las áreas donde la curva de calor acumulado en las últimas T horas estaba sobre la banda superior o bajo la banda inferior. En este caso corresponde a bandas definidas por los percentiles 10 en la inferior y 90 en la superior, y el calor liberado acumulado en un intervalo T = 24 horas. 40

Figura 4.10. Esquema explicativo del funcionamiento del indicador utilizando la metodología de bandas de alerta. La curva azul, corresponde a la curva de calor liberado acumulado, Q en las T horas previas desde la ocurrencia del evento, la curva roja corresponde a la banda superior, BS, y la curva verde corresponde a la banda inferior, BI. 42

Figura 5.1. Gráfica ROC del comportamiento del indicador y la influencia del intervalo T en este. 44

Figura 5.2. Gráfica ROC de los indicadores con la variación del parámetro $Mw*$..... 45

Figura 5.3. Exactitud ACC de los indicadores relacionado con el parámetro $Q*$ para distintos valores de $Mw*$ y el intervalo T. 46

Figura 5.4. PSS de los indicadores relacionado con el parámetro $Q*$ para distintos valores de $Mw*$ y el intervalo T 47

Figura 5.5. Gráficas ROC de los indicadores clasificados según el tiempo utilizado en el intervalo T. 48

Figura 5.6. Gráfica ROC obtenida para un calor acumulado en un intervalo $T = 24\ horas$ para las distintas combinaciones de percentiles en las bandas y para valores de $Mw\ *$de 1.5, 1.75 y 2. 49

Figura 5.7. Valores de PSS para las distintas combinaciones de percentiles y valores $Mw\ *$de 1.5; 1.75 y 2 y con un calor de acumulado en un intervalo de T = 24 horas. 50

Figura 5.8. Valores de ACC para las distintas combinaciones de percentiles con un $Mw\ *$ igual a 1.5 con un intervalo de calor acumulado de 24 horas. 51

Figura 6.1. Indicador con los parámetros $Q\ *$= 3.75[GJ], $Mw\ *$ = 1.5 y T = 24 Horas donde se muestra que los 6 eventos críticos de magnitud mayor a 4 ocurren dentro de periodos de alerta, es decir, cuando el calor liberado acumulado era mayor que el calor crítico $Q\ *$. ... 55

Figura 6.2. Desempeño del indicador con parámetros, $Mw\ *$= 1,5, intervalo T = 24 Horas, banda superior = percentil 95 y banda inferior = percentil 5, identificando estados de alerta durante el acontecimiento de los eventos de mayor magnitud. 58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Cinco mecanismos de estallidos de roca dañinos propuestos por Ortlepp (1992). 16

Tabla 3.1. Medidas estadísticas de los datos obtenidos. 29

Tabla 3.2. Parámetros de la arenisca, roca predominante en la mina. Calor específico obtenido a partir de Konakova et al. (2013) 30

Tabla 5.1. Parámetros con los que se obtuvieron los mejores PSS para esta metodología. 47

Tabla 5.2. Tablas de contingencia de las iteraciones con valores PSS más altos. 52

Tabla 6.1. Métricas FPR y TNR calculadas para los indicadores como mejores PSS y ACC. 56

Tabla 6.2. Métricas FPR y TNR calculadas para los indicadores como mejores PSS y ACC. 59

Tabla 9.1. Tabla de contingencias para valores de $Q\ *$entre 2.50 y 5.00 [GJ] 68

Tabla 9.2. Tablas de contingencias para valores de $Q*$ entre 6.25 y 8.75 [GJ]..... 69

Tabla 9.3. Tablas de contingencia para valores de $Q*$entre 10.00 y 35.00 [GJ]. 70

Tabla 9.4. Tabla de contingencias para valores de $Q*$entre 2.50 y 5.00 [GJ]. 71

Tabla 9.5. Tabla de contingencias para valores de $Q*$entre 6.25 y 8.75 [GJ]. 72

Tabla 9.6. Tablas de contingencia para valores de $Q*$entre 10.00 y 35.00 [GJ]. 73

Tabla 9.7. Tabla de contingencias para valores de $Q*$entre 2.50 y 5.00 [GJ]. 74

Tabla 9.8. Tabla de contingencias para valores de $Q*$entre 6.25 y 8.75 [GJ]. 75

Tabla 9.9. Tablas de contingencia para valores de $Q*$entre 10.00 y 35.00 [GJ]. 76

Tabla 9.10. Tablas de contingencia de los parámetros que obtuvieron mejor Skill Score PSS (valores mayores a 0.6)..... 77

Tabla 9.11. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de $Mw*$ con T = 24 horas. 78

Tabla 9.12. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de $Mw*$ con T = 36 horas. 79

Tabla 9.13. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de $Mw*$ con T = 48 horas. 80

Tabla 9.14. Porcentaje de TN en la cantidad de aciertos para T =24, 36 y 48 horas. 81

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Con el avance de la minería subterránea a mayores profundidades, esta se enfrenta a roca primaria y a campos de esfuerzo mucho mayores. La actividad minera, y en particular la tronadura llevada a cabo en este escenario particular de elevados esfuerzos, puede provocar una respuesta violenta del macizo rocoso generando eventos sísmicos significativos o violentas expulsiones de material rocoso al interior de la mina (estallidos de roca). Estos últimos pueden ser riesgosos para el personal presente y afectar también a la infraestructura y la continuidad operacional.

Casos de estallidos de roca han sido documentados en Sudáfrica, Estados Unidos, Canadá, Australia, India y minas de Sudamérica los primeros siendo registrados en la década de 1900 y aumentando su frecuencia con el tiempo (Blake & Hedley, 2003; Potvin, Hudyma, & Jewell, 2000). En Chile, según informes del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en el periodo 2000-2016 ocurrieron un total de 525 accidentes fatales siendo el 32% causados por estallidos de roca (SERNAGEOMIN, 2017) y en 2019 un 43% de los 14 accidentes fueron por el mismo motivo. (SERNAGEOMIN, 2020)

Kanamori & Heaton (2000), describen la relación entre la energía térmica liberada por un sismo y las dinámicas involucradas en el mismo. De esta conexión se desprende que los eventos sísmicos generan una significativa cantidad de energía térmica o *thermal budget* producto de la disipación de la energía mecánica y de la fricción ocurrida durante el sismo. Diversos estudios han relacionado la energía térmica con el acontecimiento de eventos sísmicos (Nikonov, 2008; Kapoor & Chauhan, 2014), y además dentro de las dinámicas de un evento sísmico existen relaciones funcionales entre la energía liberada por el evento sísmico y la magnitud de momento que han sido estudiadas en profundidad (Kanamori & Heaton, 2000).

Los indicadores sísmicos se emplean para el monitoreo de la sismicidad inducida utilizando datos de distintos parámetros que son obtenidos a través de geófonos y/o acelerómetros instalados en la mina. Estos indicadores tienen por objetivo generar estados de alerta cuando los parámetros medidos se encuentran dentro de valores anormales sugiriendo una posible

respuesta descontrolada del macizo.

Este trabajo se centra en el estudio de un nuevo indicador sísmico, utilizando el calor liberado de la microsismicidad como indicador. De esta forma, se busca determinar estados de alerta al interior de la mina en base al calor total acumulado en un intervalo de tiempo determinado y así, reducir el riesgo ante un potencial evento sísmico de magnitud significativa.

Por consiguiente, el objetivo general de esta memoria es evaluar el desempeño del indicador sísmico calor liberado utilizando datos de sismicidad inducida de la mina Bobrek en Polonia.

Como objetivos específicos están:

- Determinar valores críticos de calor liberado y magnitud que delimitarán los estados de alerta y no alerta.
- Determinar bandas de peligro asociado a calor liberado por eventos sísmicos.

El presente trabajo se centrará en el estudio del indicador sísmico calor liberado y su desempeño para determinar estados de alerta por el potencial acontecimiento de un sismo de magnitud significativa. Para ello, se utilizarán 2996 eventos sísmicos registrados en la mina Bobrek ubicada en Bytom, Polonia, entre abril de 2009 y julio de 2010.

Se estudiará el desempeño del indicador mediante un análisis de matriz de contingencia con respecto a la competencia del indicador para determinar estados de alerta al interior de la mina en comparación con el real suceso de un evento sísmico de magnitud significativa dentro de la mina Bobrek.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 RIESGO SÍSMICO

Uno de los principales objetivos del monitoreo sísmico en minería es la comprensión del riesgo sísmico en minas. El riesgo sísmico puede definirse como "una estimación de la probabilidad media (sobre espacio y tiempo) del acontecimiento de un evento sísmico de una cierta magnitud dado un intervalo de tiempo" (Gibowicz & Kijko, 1994) y comúnmente es evaluado como la medida del evento sísmico de mayor magnitud que pueda ocurrir dictando de esta forma el nivel de movimiento violento de tierra provocado por el sismo.

La incerteza es uno de los principales desafíos al momento de estimar el riesgo sísmico, la cual está ligada a la probabilidad del acontecimiento del evento, la magnitud del evento y al intervalo de tiempo definido.

Al momento de realizar la evaluación del riesgo sísmico es importante considerar que este varía en el tiempo y en el espacio. En muchas minas, el cambio de esfuerzo al que está sometida la roca, producto de la minería realizada, ejerce una influencia dominante pero discontinua en el acontecimiento de eventos sísmicos. Por otra parte, eventos sísmicos de gran magnitud son resultado de grandes fallas ocurridas en el macizo rocoso, los cuales generalmente ocurren en zonas de altos esfuerzos inducidos y de alta explotación minera (Hudyma, 2010).

Existen distintas técnicas para evaluar el riesgo sísmico. Van Aswegen (2005), propuso que el riesgo sísmico en minas es generalmente evaluado dependiendo del marco de tiempo utilizado, es decir, corto plazo, mediano plazo y largo plazo. El riesgo sísmico de largo plazo es controlado por las características geológicas de la mina. Considera la probabilidad de ocurrencia de un evento de magnitud dada y generalmente utiliza modelos numéricos calibrados en base a respuestas sísmicas de la mina registradas en el pasado. El riesgo sísmico a mediano plazo se evalúa mensualmente utilizando tendencias de los parámetros de fuente sísmica para identificar áreas más propensas a grandes eventos sísmicos. Finalmente, el riesgo sísmico a corto plazo intenta identificar condiciones de inestabilidad en el macizo rocoso que puedan llevar a grandes y dañinos eventos sísmicos. Generalmente,

es usado para evaluar el potencial acontecimiento de un evento sísmico en las siguientes horas o días.

2.2 SISMICIDAD INDUCIDA

Gibowicz (1990) establece dos tipos de sismicidad observados prácticamente en todo el mundo al interior de una mina, aquellos directamente relacionados a la actividad minera, por ejemplo, aquellos relacionados con la tronadura, y aquellos que no están directamente relacionados con la actividad minera, como aquellos asociados al movimiento de discontinuidades geológicas. Esta categorización, sin embargo, aborda solo influencias generales causantes de eventos sísmicos y no se centra en mecanismos de falla. No establece, por tanto, una distinción entre los eventos directamente inducidos por la actividad minera con aquellos que aprovechando condiciones de inestabilidad preexistentes son posteriormente desencadenados.

La principal diferencia entre estos dos tipos de eventos radica en la respuesta sísmica del macizo rocoso. Los que son directamente inducidos por la actividad minera generalmente muestran una respuesta sísmica proporcional a la escala e influencia de la actividad efectuada. Mientras que en los otros un cambio de energía relativamente pequeño puede desencadenar en eventos sísmicos de gran escala (Hudyma, 2010).

Con respecto a los mecanismos de falla, Hasegawa et. al (1989), propusieron seis mecanismos básicos de sismos inducidos, los cuales incluían colapso de cavidades, estallido en pilares, falla tensional y tres tipos de falla por deslizamiento. En la Figura 2.1 se observa el patrón de radiación de energía sísmica de campo lejano para cada uno de los seis mecanismos básicos mencionados.

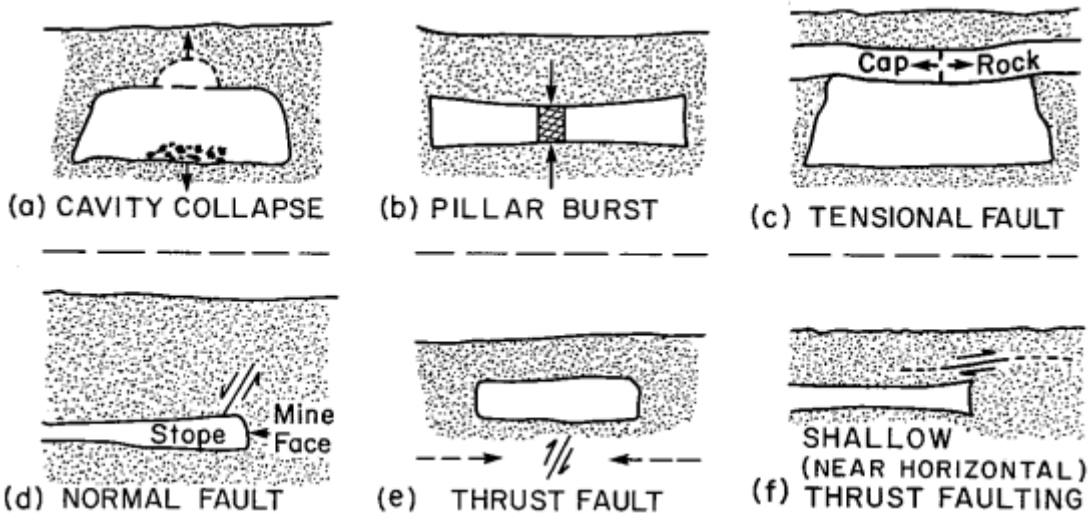

Figura 2.1. Seis mecanismos básicos de terremotos inducidos por minería (Hasegawa et al.,1989)

Posteriormente, Ortlepp (1992), analiza cinco mecanismos de estallido de roca dañinos describiendo el movimiento típico de macizo, la dirección del primer movimiento que sería registrado por los sensores sísmicos y el rango de magnitud máxima aproximada de eventos para cada mecanismo mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Cinco mecanismos de estallidos de roca dañinos propuestos por Ortlepp (1992).

Evento Sísmico	**Mecanismo Fuente Postulado**	**Primer Movimiento a partir de registrados sísmicos**	**Magnitud Richter M_L**
Estallido por deformación	Desprendimiento superficial con violenta ejección de fragmentos	Usualmente indetectable, podría ser implosivo	-0.2 a 0
Pandeo	Expulsión hacia el exterior de grandes losas preexistentes paralelas a las labores	Implosivo	0 a 1.5
Trituramiento de pilar o cara	Colapso repentino del pilar del caserón , o violenta expulsión de roca desde la cara del túnel	Implosivo	1.0 a 2.5
Ruptura por cizallamiento	Violenta propagación de una fractura de cizallamiento a través de roca intacta	Doble cupla en cizalla	2.0 a 3.5
Falla por deslizamiento	Violento movimiento reanudado en una falla existente	Doble cupla en cizalla	2.5 a 5.0

Si bien estos mecanismos entregan valiosa información para eventos grandes, cerca del 90% de los eventos sísmicos en minas tienen magnitudes de momento menores a 0. Estos eventos microsísmicos no se ajustan a los descritos por Hasegawa et. al (1989) y Ortlepp (1992) , y además, excepcionalmente resultan en daños observables del macizo. (Hudyma, 2010).

Los mecanismos de falla presentes en eventos microsísmicos incluyen a los mencionados por Ortlepp. Además, se le agregan los siguientes:

- Fractura intacta en roca frágil
- Coalescencia de fracturas en el macizo rocoso
- Grandes esfuerzos actuando en pilares de galerías
- Cizalle o trituramiento de contactos litológicos

Posteriormente, Richardson & Jordan (2002) definieron dos tipos de sismos relacionados a la operación minera. Los de tipo A ocurren por la interacción entre esfuerzos inducidos por la minería y esfuerzos tectónicos locales y se agrupan principalmente cerca de las galerías. Presentan magnitudes bajas y medias, y componentes significativos no doble cupla.

Por otra parte, los de tipo B presentan mayores magnitudes y sus mecanismos están asociados a fallas preexistentes u otras zonas de debilidad y por lo tanto son más del tipo doble cupla.

En Chile, estudios realizados principalmente en la mina El Teniente han permitido identificar que la sismicidad allí registrada tiene una relación causal con la explotación de la roca primaria y con la actividad minera. La actividad sísmica se ve distribuida en periodos de régimen permanente (ruido de fondo) y transiente (crisis sísmicas) y esta se concentra principalmente en el sector de la propagación del Caving.

2.3 ENERGÍA TÉRMICA DE TERREMOTOS

Los eventos microsísmicos son terremotos de muy baja magnitud y típicamente definidos por la comunidad sismológica como eventos que no son percibidos por la población lo que usualmente implica eventos con magnitudes inferiores a M_w = 3 (Nakata, Lumley, & Nakata, 2015). M_w, por su parte, es una medida adimensional de la magnitud de un terremoto definida por Kanamori & Heaton (1979) como:

$$logM_0 = 1.5M_w + 9.1 \qquad (1)$$

El momento sísmico, M_0, es una medida del trabajo realizado por el fallamiento de un terremoto que resulta en un desplazamiento inelástico de la corteza terrestre y se mide en $[Nm]$. Se puede definir como:

$$M_0 = \mu SD \tag{2}$$

Donde S es el área de falla, D el intervalo de desplazamiento provocado por el evento sísmico y μ es la rigidez. La existencia de una fuente de energía térmica generada por eventos sísmicos denominada presupuesto térmico o *"thermal budget"* sugiere un rol clave de esfuerzo friccional σ_f durante el fallamiento (Kanamori & Heaton, 2000). De acuerdo a esto, el calor total generado será:

$$Q = \sigma_f DS \tag{3}$$

Si se asume que el calor es distribuido durante el fallamiento dentro de una capa de grosor w alrededor del plano de ruptura, el aumento de temperatura promedio estaría dado por:

$$\Delta T = \frac{Q}{C\rho Sw} = \sigma_f D / C\rho w \tag{4}$$

Donde C es el calor específico y ρ es la densidad. Luego, utilizando un modelo circular donde la caída de esfuerzo estático es $\Delta\sigma_s$ (Eshelby, 1957):

$$D = \left({}^{16}/_{7}\right)^{2/3}\left({}^{1}/_{\pi}\right) {M_0}^{1/3} \Delta {\sigma_s}^{2/3} / \mu \tag{5}$$

A partir de distintos catálogos de eventos registrados en el centro, norte y noroeste de Europa, se obtuvo una relación a entre M_w y M_L (Richter, 1935). En particular, utilizando el catálogo del Instituto de Nacional de Geofísica y Vulcanología de Italia (INGV) se estableció que:

$$M_w = 0.906 M_L + 0.65 \tag{6}$$

Luego, de (4) y (5) se obtiene:

$$\Delta T = \left({}^{16}/_{7}\right)^{2/3}\left({}^{1}/_{\pi}\right)\sigma_f \Delta\sigma_s{}^{2/3} M_0{}^{1/3}/\mu C\rho w \tag{7}$$

Finalmente S queda definido por:

$$S = \frac{M_0}{\Delta\sigma_s C_s} \tag{8}$$

Donde C_s es una constante definida por la geometría de la falla y se aproxima a 1 (Madariaga, 1977).

Las dinámicas y la física involucradas en un terremoto son altamente complejas, sin embargo, en forma simplificada, un terremoto se puede explicar como un proceso de liberación de esfuerzo acumulado sobre una superficie S. Durante un terremoto, el esfuerzo inicial σ_0 cae hasta un esfuerzo final σ_1. En el modelo más simple, esta caída de stress denominada $\Delta\sigma_s$, se realiza bajo un esfuerzo friccional constante σ_f. Al final del terremoto el desplazamiento medio o intervalo de desplazamiento será D y el esfuerzo final será $\sigma_1 = \sigma_f$. Durante este proceso se experimenta una variación en la energía del sistema ΔW, la cual está definida por:

$$\Delta \mathrm{W} = \mathrm{E_R} + \mathrm{E_F} + \mathrm{E_G} \tag{9}$$

Donde E_R es la energía emitida trasportada por la onda sísmica, E_F es la pérdida de energía friccional y E_G es la energía de fractura. Además, se puede definir $\bar{e}$, como la energía escalada la cual se puede interpretar como escalas de energía emitida adimensional en base a M_0:

$$\bar{e} = \frac{E_R}{M_0} \tag{10}$$

Es importante mencionar que en los eventos sísmicos de baja magnitud ($M_w < 2$) $\bar{e}$ es entre 10 a 100 veces más pequeño en comparación con eventos más grandes lo que indica que los

sismos pequeños son menos eficientes al emitir ondas que los sismos más grandes. Además, pueden ser significativamente menos dúctiles que los eventos de gran magnitud.

Finalmente, mencionar que una reactivación moderada de fallas o un fracturamiento significativo de rocas pueden inducir eventos microsísmicos de magnitudes menores a M_w = 2.0 con desplazamiento de roca asociados de menos de un centímetro a lo largo de la fractura. Estos eventos son aproximadamente 100 a 1000 veces más débiles (energéticamente) que eventos sísmicos perceptibles (Nakata, Lumley, & Nakata, 2015).

2.4 INDICADORES SÍSMICOS

A lo largo de los años de estudio respecto a la sismicidad inducida distintos indicadores sísmicos se han desarrollado con el objetivo de monitorear las condiciones y la respuesta del macizo rocoso a la minería aplicada y así generar estados de alerta ante el eventual acontecimiento de un evento sísmico. Los estados de alerta generados son periodos de tiempo durante los cuales se pronostica el potencial acontecimiento de un evento sísmico de magnitud significativa dada. Identificar estos periodos tiene por objetivo reducir el riesgo del personal dentro de la mina y localizar zonas críticas que sean más propensas a experimentar eventos sísmicos.

Basándose en distintos parámetros y mediante la utilización de redes sísmicas compuestas por geófonos y/o acelerómetros algunos de los indicadores más utilizados son:

- Probabilístico (Benjamin, 1968)
- Modelo Epidémico (Ogata, 1988)
- Frecuencia de eventos (Dunlop & Gaete, 1997; Vallejos & McKinnon, 2008; Vallejos et al., 2012)
- Aglomeramiento Espacial (Malek & Leslie, 2006; Vergara, 2021)
- Tasa genérica del momento sísmico (Shcherbakov et al., 2010)

En el presente trabajo se estudiará el desempeño del indicador energía friccional liberada (calor) por los eventos sísmicos el cual corresponde a un nuevo indicador desarrollado en este trabajo.

A partir del cálculo del calor liberado acumulado en un periodo de tiempo dado se buscará determinar estados de alerta generando bandas de alerta o estableciendo un calor acumulado crítico. El tiempo de observación de eventos sísmicos, Δt, será de 8 horas correspondientes a un turno de la misma duración.

De esta manera, si el calor acumulado durante un intervalo de tiempo T supera el umbral establecido de calor acumulado crítico o está fuera de las bandas de alerta generadas se establece un estado de alerta en donde es esperable que ocurra evento sísmico de magnitud relevante a determinar.

2.5 ANÁLISIS ROC

El análisis ROC (Característica Operativa del Receptor en español y, Receiver Operating Characteristic por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada para visualizar, organizar y seleccionar clasificadores basada en su desempeño. Esta técnica ha sido utilizada a lo largo de los años en la teoría de detección de señales para representar el *"tradeoff"* entre las tasas de acierto y falsa alarma de un clasificador (Egan, 1975; Swets, Dawes, & Monahan, 2000). En análisis ROC es comúnmente utilizado en la visualización y análisis del comportamiento de sistemas de diagnóstico (Swets J. , 1988).

Dado un clasificador y un instancia I existen 4 posibles resultados. Si la instancia es positiva y es clasificada como positiva se cuenta como un TP (True Positive/ Verdadero Positivo), y si es clasificada como negativa se cuenta como un FN (False Negative/ Falso Negativo). Por otra parte, si la instancia es negativa y es clasificada como negativa se cuenta como un TN (True Negative/ Verdadero Negativo), y si es clasificada como positiva se cuenta como un FP (False Positive/ Falso Positivo). Dado un clasificador y un set de instancias se puede construir una "*matriz de confusión"* (o Tabla de Contingencia) representando la disposición del set de instancias. (Fawcett, 2006).

En la Figura 2.2 se observa la matriz de confusión que se genera a partir del set de instancias y los distintos parámetros que se pueden calcular a partir de la matriz ya mencionada. Los números en la diagonal principal corresponde a las decisiones correctas mientras que los números en la otra diagonal corresponde a los errores cometidos.

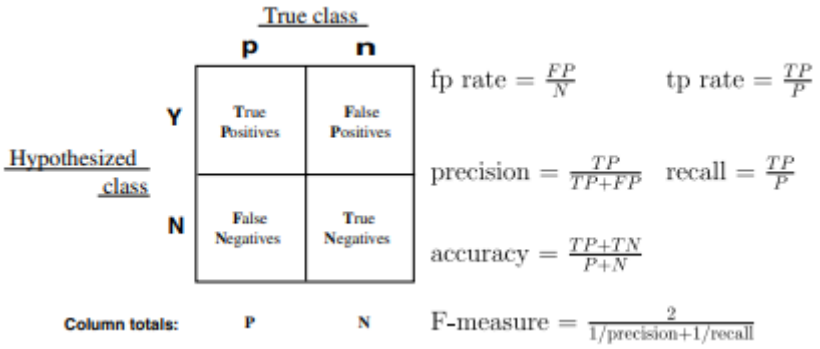

Figura 2.2. Matriz de confusión generada y las métricas que se pueden calcular de ella. (Fawcett, 2006)

Otro índice estadístico que puede ser calculado a partir de la matriz es el *Skill score de Peirce* o PSS por (Peice, 1884). Este entrega una comparación directa entre distintos modelos de clasificación utilizados y está definido como:

$$PSS = TPR - FPR \tag{11}$$

Donde TPR corresponde a la tasa de verdaderos positivos y FPR a la tasa de falsos positivos. Este índice entrega valores entre -1 y 1 indicando según esto si el modelo de clasificación es perfecto (igual 1), aleatorio (igual a 0) o peor que aleatorio (igual a -1).

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Mina Bobrek

La Cuenca de Carbón de Alta Silesia (USCB, por sus siglas en inglés) ha sido una zona sometida a una intensa explotación de carbón desde el siglo XVIII y actualmente más de 30 minas realizan explotaciones en la zona. Dentro de la USCB destacan tres estructuras tectónicas que influyen en la mina Bobrek como lo son: el complejo Anticlinal Principal, el complejo Sinclinal de Bytom y la Falla de Kłodnicki. Esta es una de las zonas mineras más sísmicamente activas del mundo registrando cerca de 56.000 terremotos con energía E> 10^5 [J] (M_L > 1.6) entre 1974 y 2005 (Stec, 2007).

La mina se encuentra cerca del complejo Sinclinal de Bytom el cual se compone de depósitos de intensa sedimentación de finales del periodo Carbonífero y están representados por areniscas, argilitas y capas de conglomerados con un grosor total de unos pocos kilómetros, interestratificado con capas de carbón. Este complejo fue afectado a un plegamiento produciendo un pliegue sinclinal con ramas de fuerte buzamiento. Después del periodo Carbonífero, el complejo Sinclinal fue cubierto por depósitos del Triásico y Cuaternario (Marcak & Mutke, 2013). En la Figura 3.1 se muestra la litoestratigrafía y tectónica de la zona en cuestión.

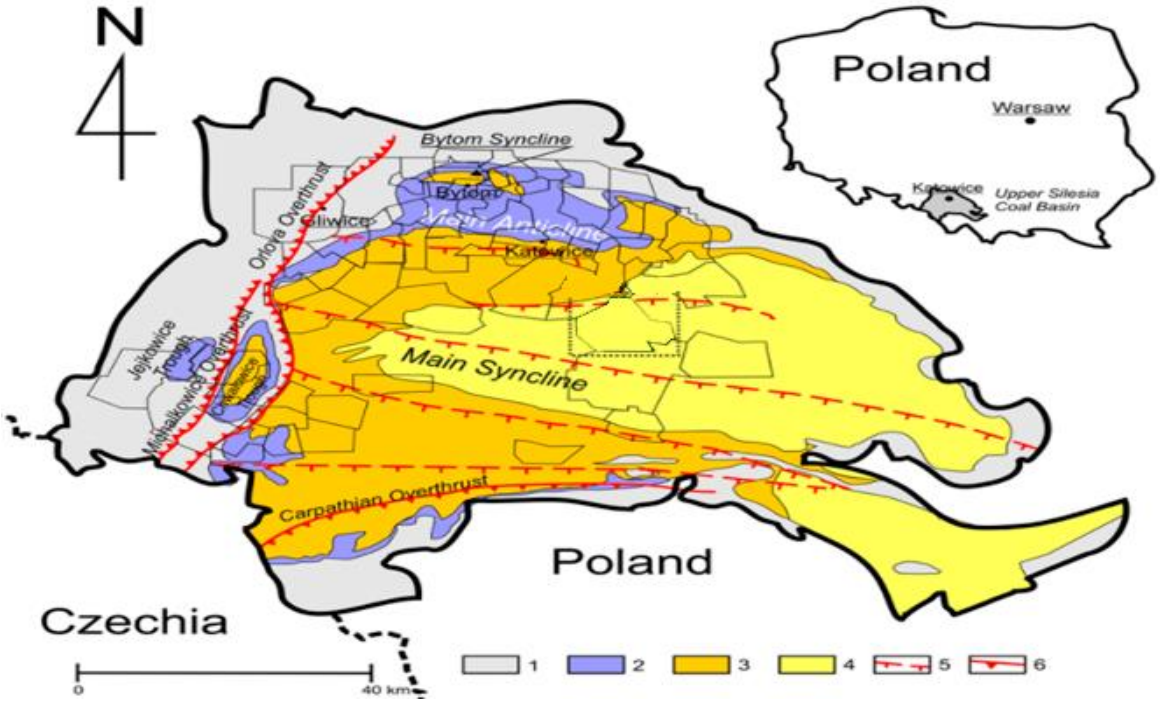

Figura 3.1. Litoestratigrafía y tectónica de la USCB: 1- Serie Parálica (Misisípico Superior-Pensilvánico inferior), 2- Serie de areniscas de la Alta Silesia (Pensilvánico inferior), 3- Serie de argilitas (Pensilvánico inferior-intermedio), 4- Serie de areniscas de Cracovia (Pensilvánico intermedio), 5- Fallas importantes, 6- Cabalgamientos. (Mendecki et al., 2018)

La mina utiliza un método multinivel en un sistema de *longwall mining* para explotar las vetas de carbón. Este método es el más usado en Polonia debido a su posibilidad de mecanización lo que aumenta la concentración de la extracción, la eficiencia y disminuye los costos. De esta forma, el carbón es extraído por un equipo llamado *shearer* el cual se mueve a lo largo de la cara de carbón expuesta entre las dos galerías llamadas *headgate* y *tailgate* como se puede observar en la Figura 3.2.

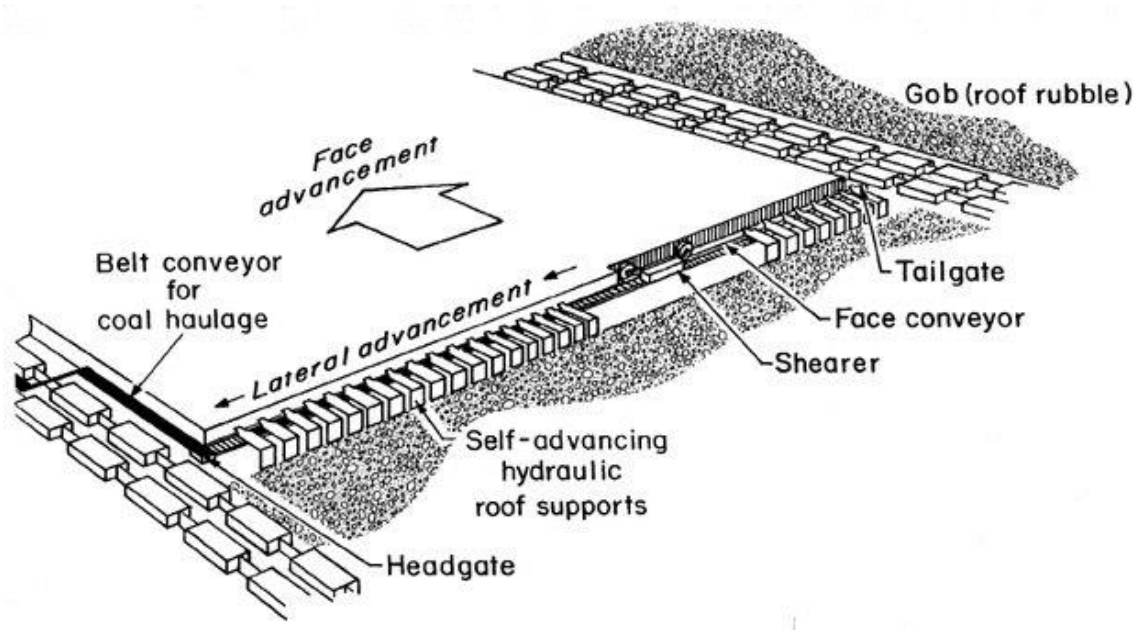

Figura 3.2. Componentes básicos de un método longwall. (Sammarco et. al 1997).

En las minas de Polonia, usualmente los paneles de *longwall* tienen un ancho de 150-300 m. y un largo de 2000 m. El *shearer* corta una tajada de carbón a su paso de 0.6-1 m. de grosor. El área de trabajo es protegida por un techo de soporte hidráulico móvil y a medida que la explotación progresa el techo sobre la veta minada se deja colapsar detrás de la cara del *longwall* dejando una cavidad con roca colapsada llamada "*goaf*" (Wojtecki et al., 2021). Este método provoca una alteración en los esfuerzos tanto en la cara del frente de avance como en los bordes del panel entre el *headgate* y el *tailgate*.

Stec (2007) identificó 3 tipos de fuentes sísmicas asociadas a la explotación en minas ubicadas en la USCB. El primer tipo corresponde a eventos con mecanismos focales de deslizamiento y cizallamiento. Estos eventos ocurren durante el progreso de la explotación como resultados de fracturas en la veta de complejos rocosos gruesos y compactos con altos parámetros de rigidez y resistencia. El segundo tipo son eventos caracterizados por mecanismos con componentes no cortantes. Tales eventos están ubicados directamente en la veta de carbón y en los alrededores de las caras activas. El tercer grupo comprende eventos caracterizados por su alta energía los cuales usualmente ocurren lejos de áreas con actividad minera. Sus mecanismos son de deslizamiento de carácter normal o reverso. La causa más común de estos eventos es la interacción de esfuerzos tectónicos y residuales existentes en el área analizada con esfuerzos inducidos por la minería.

Durante la explotación de la veta 503 entre los años 2009 y 2010 ocurrió un evento de magnitud M_L 3.7 en el momento en que el frente de avance se encontraba muy cercano al eje Sinclinal de Bytom. El evento se registró a más de 500 m. por debajo del nivel de la veta lo que sugirió una fuente sísmica de carácter tectónico. Inusualmente no se registraron réplicas luego del evento lo que podría estar relacionado a la velocidad de ruptura y a la heterogeneidad del ambiente rocoso (Kozlowska, et al., 2016). El frente de avance en el panel n° 3 se mueve de Norte a Sur lo que quiere decir que es perpendicular al eje Sinclinal de Bytom como se observa en la Figura 3.3. Tanto el aumento de la sismicidad como el cambio en la distribución de la profundidad de esta fue provocado por el cruce del frente de avance por sobre el eje Sinclinal que en este punto se extiende como una rama de fuerte buzamiento (Marcak & Mutke, 2013).

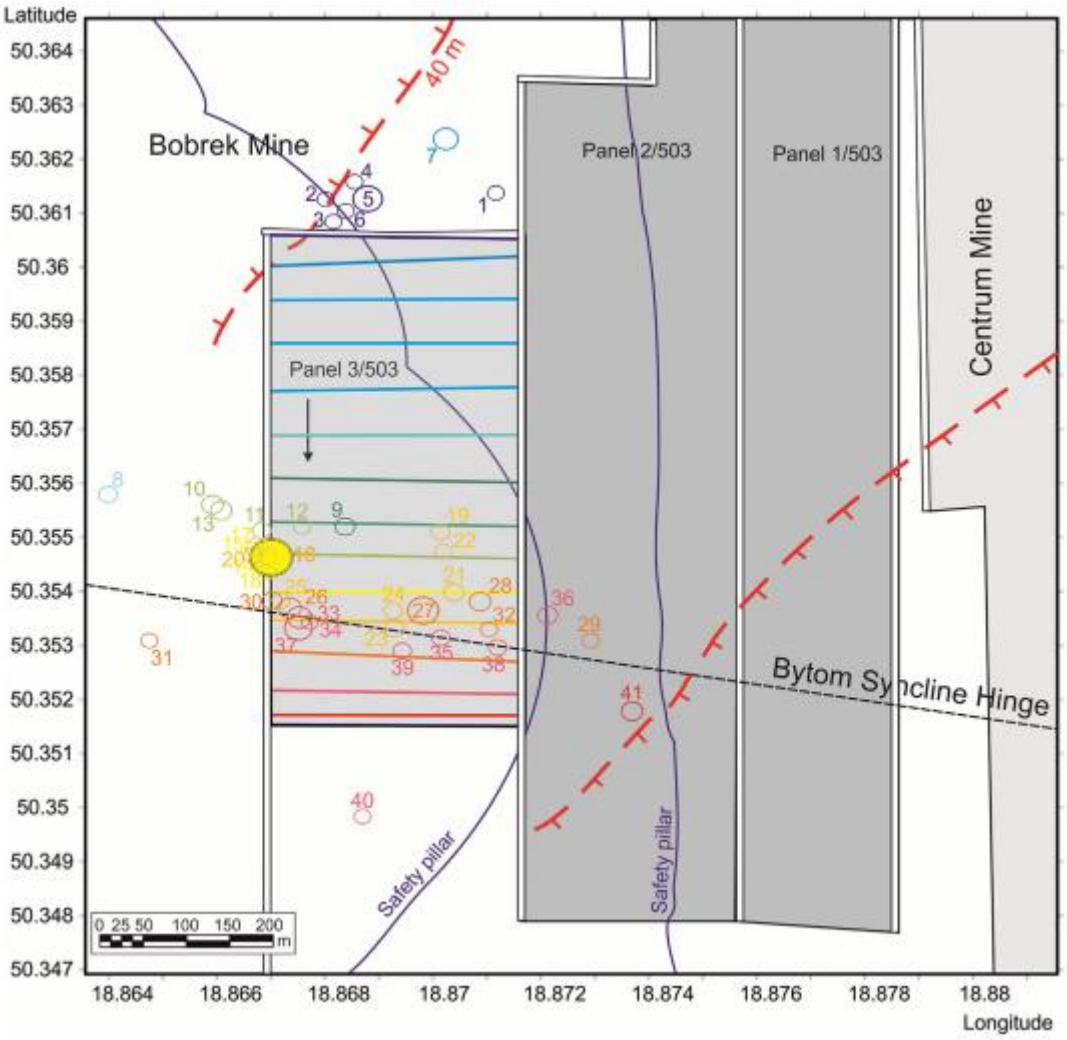

Figura 3.3. Condiciones del frente de avance del panel 3 de la veta 503. Los círculos indican eventos sísmicos (el círculo amarillo indica el evento de mayor magnitud); las líneas horizontales de colores muestran el avance del frente del longwall; la escala de colores de las líneas muestra la correspondencia entre el avance del longwall y los eventos sísmicos. (Mendecki et al., 2020)

Se descartó que el aumento de sismicidad estuviera relacionado con el mejoramiento de la red de monitoreo (que pasó de 12 a 18 sismómetros) y se vinculó principalmente al cruce del frente de avance por sobre el eje Sinclinal de Bytom y a la presencia de pilares, remanentes y excavaciones irregulares dejados por la explotación previa de la veta (Mendecki, Wojtecki, & Zuberek, 2019).

3.1.2 Datos

Para este trabajo se utilizó un catálogo de 2996 eventos sísmicos registrados durante la explotación del panel n°3 de la veta 503 de la mina, ubicada a 700 m. de profundidad, entre el 12 de abril de 2009 y el 8 de julio de 2010 los cuales fueron registrados por una red sísmica local de la mina la cual se componía en su inicio de 12 sismómetros (siete verticales y cinco triaxiales) (Kozlowska & Orlecka-Sikora, 2017). Los datos fueron obtenidos de la plataforma del Sistema Europeo de Observación de Placas (EPOS, por sus siglas en inglés) (IS EPOS, 2017)

La Figura 3.4 muestra el histograma frecuencia-magnitud, convertida a M_w a partir de la ecuación (6), de los eventos sísmicos, siendo el evento de mayor magnitud de $M_{L,max}$= 3.7 ($M_{w,max}$ = 4.00) ocurrido el 16 de diciembre de 2009. Este evento provocó que se añadieran a la red sísmica otros seis sismómetros verticales a partir de enero de 2010.

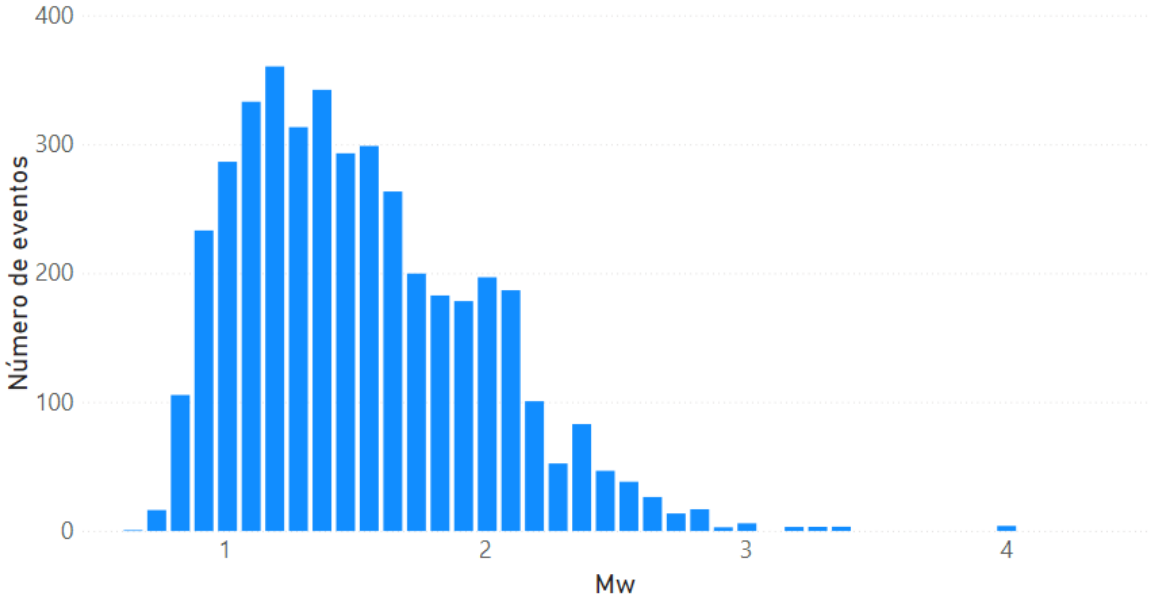

Figura 3.4. Histograma de los eventos sísmicos registrados entre 2009 y 2010.

En la Figura 3.5 y la Tabla 3.1 se muestra la distribución de los eventos dentro del periodo de estudio. Se observa una distribución asimétrica de los eventos donde el promedio de eventos diarios se comporta en forma variable en el tiempo. Luego del evento de gran magnitud, $M_{L,max}$ 3.7, se observó un aumento en la frecuencia de eventos llegando a un promedio de 18.4 eventos diarios entre mediados de enero y mediados de febrero

(Leptokaropoulos, et al., 2017). En la Figura 3.6 se muestran los eventos registrados acumulados en el tiempo.

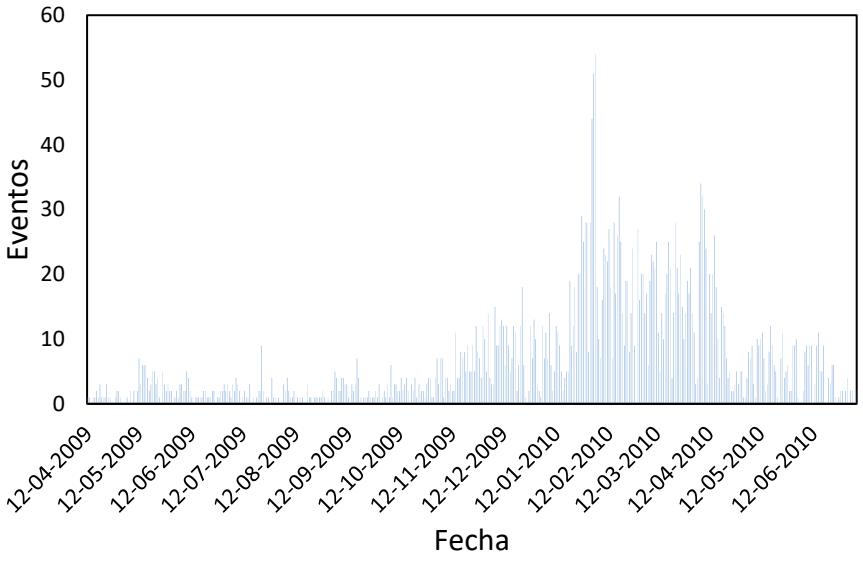

Figura 3.5. Distribución de los eventos por día.

Tabla 3.1. Medidas estadísticas de los datos obtenidos.

$\bar{x}$ [Datos/día]	6.63
Desviación Estándar	8.020
Moda [Eventos]	1
Mediana [Eventos]	3
Valor mínimo (X_{min}) [Eventos]	0
Valor máximo (X_{max}) [Eventos]	54

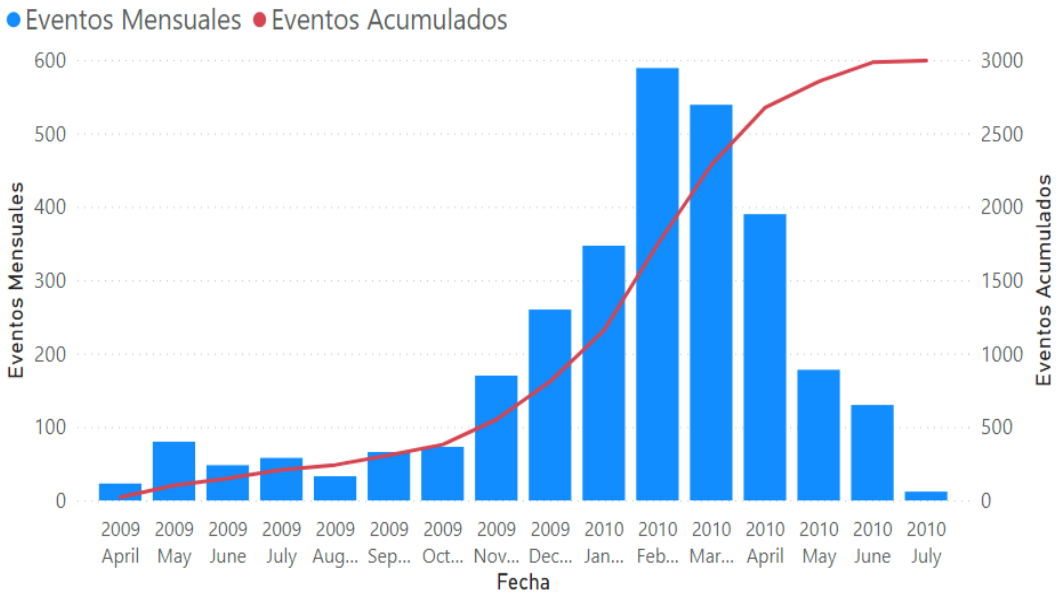

Figura 3.6. Eventos mensuales y eventos acumulados a lo largo del periodo.

Para el cálculo del calor liberado por los eventos sísmicos en base a las Ecuaciones (3), (5) y (8) es necesario establecer los parámetros de la arenisca, roca predominante en la mina, los cuales se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de la arenisca, roca predominante en la mina. Calor específico obtenido a partir de Konakova et al., (2013)

$\boldsymbol{C}\ \left[\frac{\boldsymbol{J}}{\boldsymbol{kg\ K}}\right]$	723.5
$\boldsymbol{\rho}\ \left[\frac{\boldsymbol{kg}}{\boldsymbol{m^3}}\right]$	2510
$\boldsymbol{\mu}\ [\boldsymbol{GPa}]$	2.2
$\Delta\boldsymbol{\sigma_s}[\boldsymbol{MPa}]$	1
$\boldsymbol{\sigma_f}[\boldsymbol{MPa}]$	14.3
$\boldsymbol{w}\ [\boldsymbol{m}]$	0.001

Ante la imposibilidad de obtener la información directa desde los sismómetros utilizados en la mina, se determinaron los valores de $\Delta\sigma_s$ y σ_f de la Tabla 3.2 a partir de datos de sismicidad de una mina nacional.

Estos datos permitieron calcular un valor de ε promedio dentro de un lapso de 7 años de mediciones. ε se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta\sigma_d} \tag{12}$$

Siendo $\Delta\sigma_d$ la caída de esfuerzo dinámico. Luego, utilizando un valor de $\Delta\sigma_s$, obtenido a partir de un estudio realizado por (Abercrombie & Leary, 1993) en donde se establece que el valor de este parámetro asociado a eventos sísmicos inducidos por la actividad minera se encuentra entre 0.1 y 1 [MPa], se determinó el valor de $\Delta\sigma_d$. La caída de esfuerzo dinámico $\Delta\sigma_d$ se relaciona con σ_f a partir de la siguiente relación (Debski, 2018):

$$\Delta\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_f \tag{13}$$

Donde σ_0 corresponde al esfuerzo de corte previo a la ocurrencia de un evento, para este valor se utilizó un valor de esfuerzo corte in situ determinado a partir de la roca predominante y de la profundidad del yacimiento σ_0 = 15 [MPa].

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para este trabajo se utilizaron dos metodologías para determinar el desempeño del indicador. La primera, definida como "Calor Liberado Acumulado Crítico", utiliza los parámetros Q^* y ${M_w}^*$ para definir estados de alerta. La segunda, definida como "Bandas de Alerta", utiliza intervalos de riesgo definidos a partir de percentiles del calor acumulado semanal.

Con los valores obtenidos en ambas metodologías se determinará el *Skill Score* PSS y el índice ACC para realizar una comparación directa entre las distintas iteraciones e indicadores y, de esta forma, encontrar a los de mejor desempeño.

4.1 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO

Esta metodología consiste en la determinación de los parámetros Q^* y ${M_w}^*$ que permitan el mejor desempeño del indicador.

En primer lugar, se construyó una curva con el calor liberado acumulado durante un intervalo T variable antes de cada evento del catálogo. El intervalo T tomó valores de 24, 36 y 48 horas.

Es decir, cada punto de la curva de calor acumulado, Q, corresponde al calor liberado acumulado T horas desde la ocurrencia del evento hacia atrás. La Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 muestran ejemplos de las curvas Q construidas.

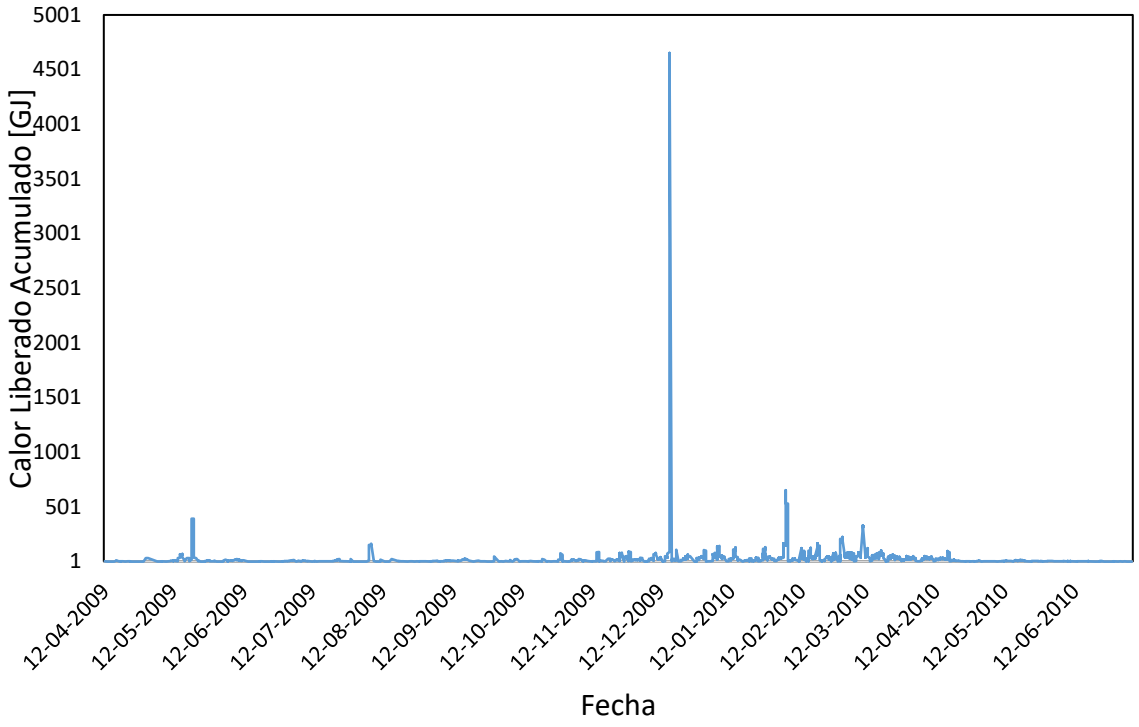

Figura 4.1. Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 24\ horas$.

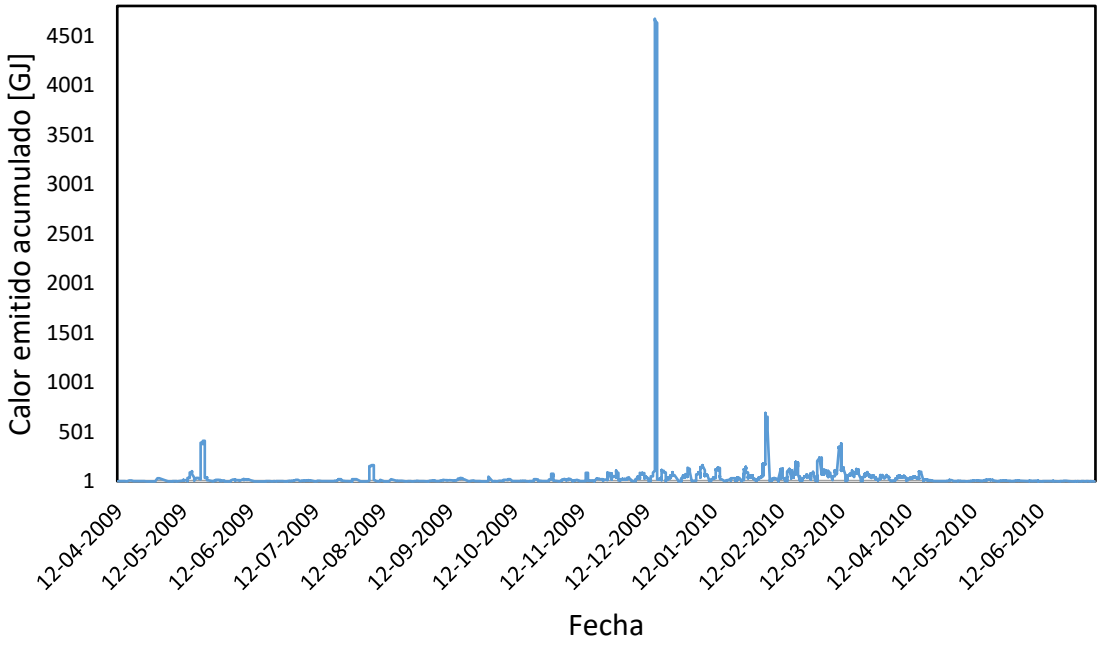

Figura 4.2. Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 36\ horas$.

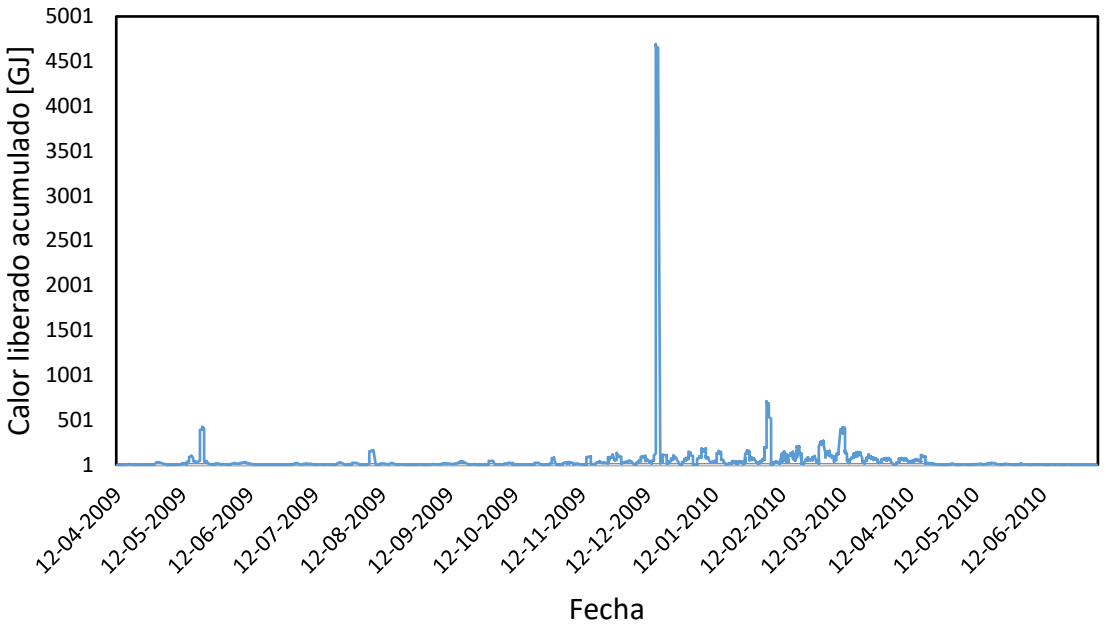

Figura 4.3 Calor liberado acumulado en un intervalo $T = 48\ horas$.

Con cada una de estas curvas se realizarán iteraciones para definir los parámetros:

a. Magnitud de momento crítica ($M_w{}^*$): magnitud de momento a partir de la cual se considerará como evento relevante para probar el desempeño del indicador.
b. Calor liberado acumulado crítico (Q^*): calor liberado acumulado a partir del cual se establece un estado de alerta por posibilidad de evento sísmico con magnitud mayor o igual a $M_w{}^*$.

Se variará los parámetros Q^* y $M_w{}^*$ en busca de la combinación de estos que entregue el mejor desempeño. Se define que cuando $Q > Q^*$ se estará en un estado de alerta y, cuando $Q < Q^*$ se estará en un estado de no alerta.

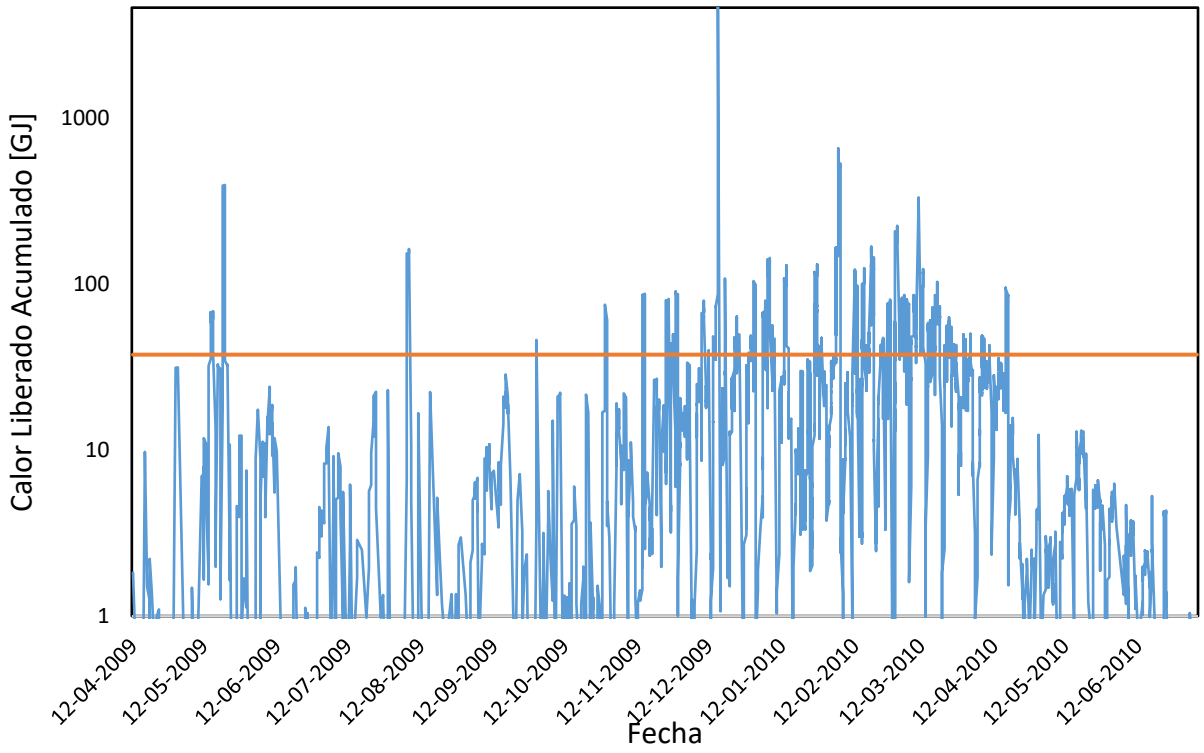

Figura 4.4. Ejemplo de la recta de Q^* sobre la curva de calor acumulado liberado. La recta anaranjada corresponde al calor crítico definido Q^* y los puntos de la curva de calor acumulado liberado que están sobre la recta definen el estado de alerta.

Dicho esto, se procederá a realizar una revisión punto a punto de la curva observando si los estados determinados por el indicador se condicen con la ocurrencia de eventos del catálogo. Es decir, empezando por el primer punto de la curva y durante un tiempo de observación, Δt, establecido en 8 horas se procederá a corroborar si el estado de alerta definido es correcto. Para ello durante estas 8 horas se buscará la ocurrencia de eventos de magnitud de momento igual o superior a ${M_w}^*$ y se clasificarán de acuerdo con un análisis ROC detallado a continuación:

Si en el punto de la curva estudiado:

- $Q > Q^*$, se define un estado de alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas ocurre algún evento de magnitud superior o igual a ${M_w}^*$, se clasifica como un verdadero positivo (TP).

- $Q > Q^*$, se define un estado de alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas no ocurre ningún evento de magnitud superior o igual a ${M_w}^*$, se clasifica como un falso positivo (FP).
- $Q < Q^*$, se define un estado de no alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas ocurre algún evento de magnitud superior o igual a ${M_w}^*$, se clasifica como un falso negativo (FN).
- $Q < Q^*$, se define un estado de no alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas no ocurre ningún evento de magnitud superior o igual a ${M_w}^*$, se clasifica como un verdadero negativo (TN).

La Figura 4.5 muestra un esquema explicativo del funcionamiento de esta metodología para el indicador, detallado a continuación.

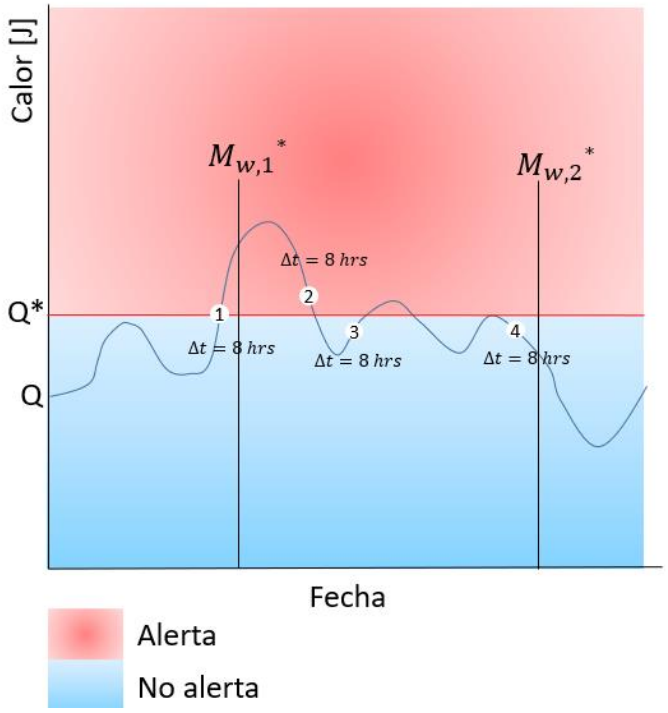

Figura 4.5. Esquema explicativo del funcionamiento del indicador utilizando la metodología de calor acumulado crítico. La curva azul, corresponde a la curva de calor liberado acumulado, Q en las T horas previas desde la ocurrencia del evento y la recta roja corresponde al calor liberado acumulado crítico, Q^*.

Existen 4 escenarios posibles al momento de revisar cada punto de la curva Q:

- El punto 1 de la curva Q se encuentra en un estado de alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud ${M_{w,1}}^* \geq {M_w}^*$ por lo que el indicador clasifica esta instancia como verdadero positivo (TP).
- El punto 2 de la curva Q se encuentra en un estado de alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs no se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud significativa ($\geq {M_w}^*$) por lo que el indicador clasifica esta instancia como falso positivo (FP).
- El punto 3 de la curva Q se encuentra en un estado de no alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs no se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud significativa ($\geq {M_w}^*$) por lo que el indicador clasifica esta instancia como verdadero negativo (TN).
- El punto 4 de la curva Q se encuentra en un estado de no alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud ${M_{w,2}}^* \geq {M_w}^*$ por lo que el indicador clasifica esta instancia como falso negativo (FN).

El indicador trabaja clasificando instancias punto por punto de la curva Q, es decir, con el calor liberado acumulado en las últimas T horas desde la ocurrencia de cada evento del catálogo, y de esta forma continua hasta revisar toda la curva Q.

Una vez terminada la revisión de toda la curva se realiza una nueva revisión, pero variando los parámetros Q^* y ${M_w}^*$ y el intervalo T.

4.2 BANDAS DE ALERTA

Esta metodología aplicada consta de la construcción de intervalos de riesgo a partir de percentiles del calor liberado acumulado semanal. La banda superior (BS) variará entre los percentiles 85, 90 y 95, y la banda inferior (BI) entre los percentiles 5,10 y 15. Algunas de estas combinaciones se observan en la Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8.

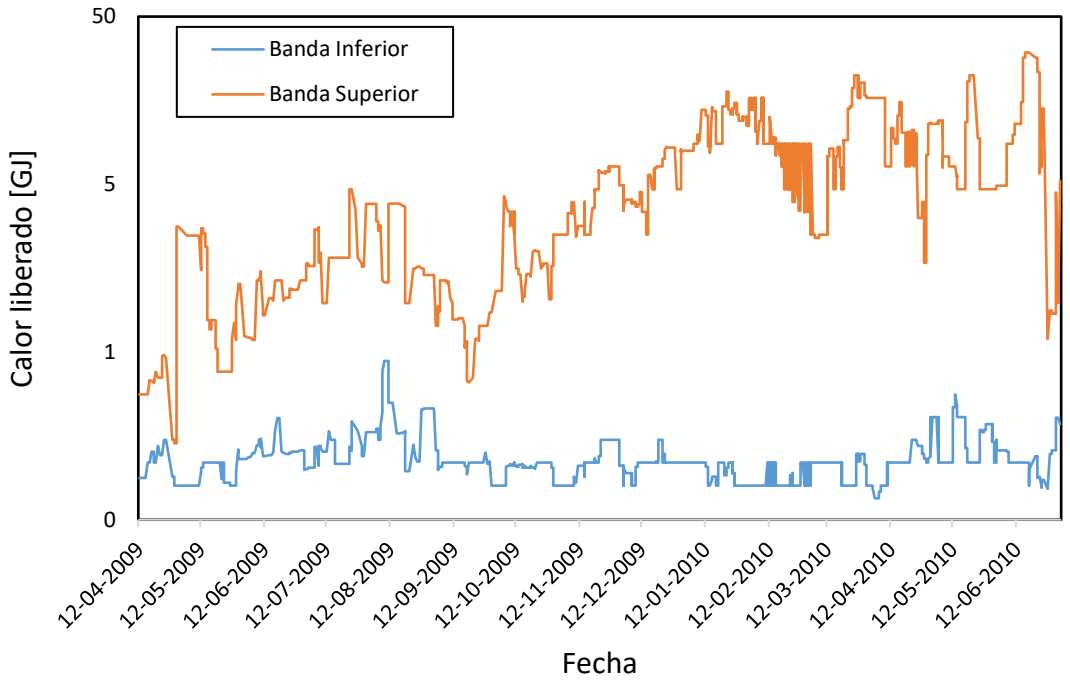

Figura 4.6. Bandas de alerta con percentiles 95 en la banda superior y 5 en la banda inferior.

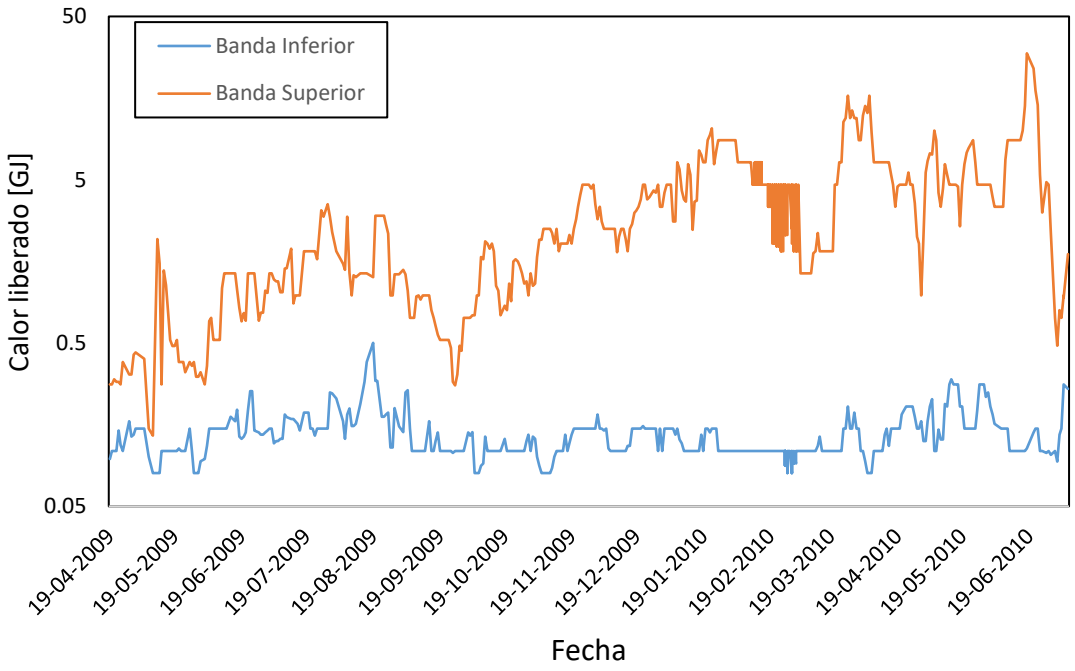

Figura 4.7. Bandas de alerta con percentiles 90 en la superior y 10 en la inferior.

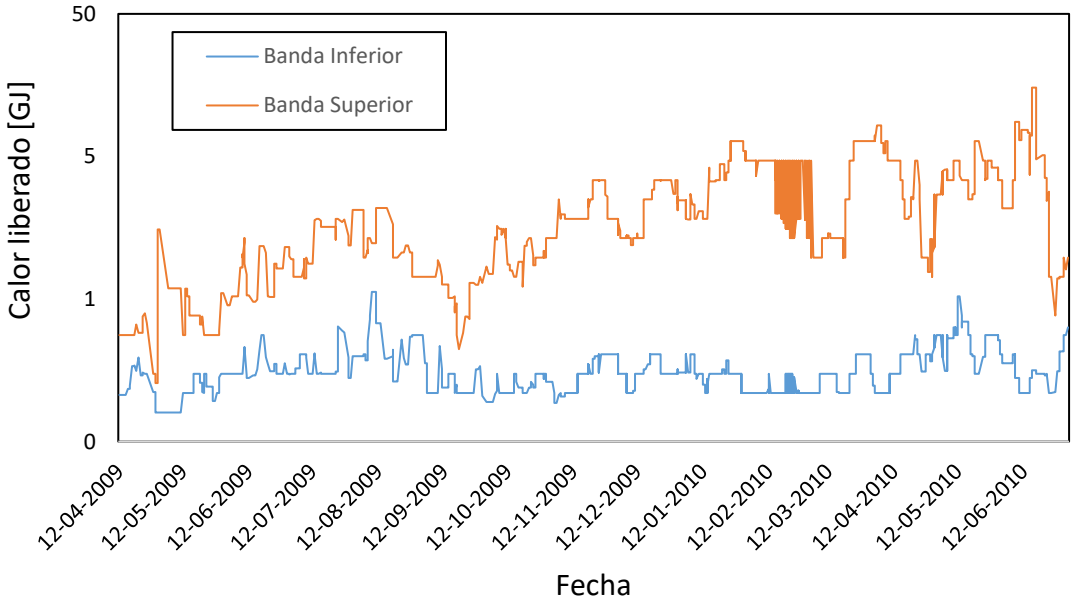

Figura 4.8. Bandas de alerta con percentiles 85 en la superior y 15 en la inferior.

Se utilizará nuevamente la curva Q, construida en la metodología anterior, pero esta vez solo se variará el valor del intervalo T y el parámetro ${M_w}^*$. El parámetro Q^* no forma parte de esta metodología pues los estados de alerta se determinan a partir de la relación de la curva Q con las bandas de alerta.

De esta forma, los estados de alerta quedarán definidos cuando la curva Q este fuera del área delimitada por las bandas, es decir, cuando el calor liberado acumulado en un tiempo T desde la ocurrencia del evento hacia atrás sea inferior al percentil de la banda inferior del calor semanal o superior al percentil de la banda superior del calor semanal como se observa en la Figura 4.9.

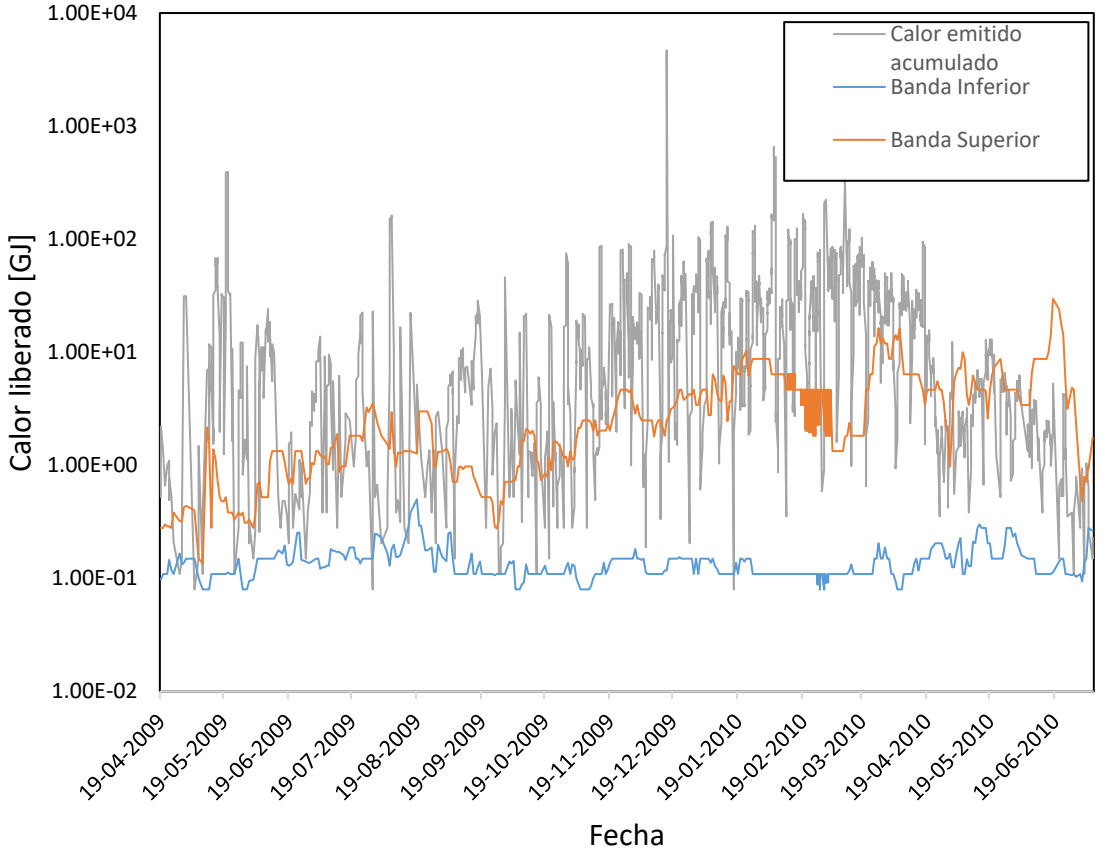

Figura 4.9. Ejemplo del estado de alerta definido por las áreas donde la curva de calor acumulado en las últimas T horas estaba sobre la banda superior o bajo la banda inferior. En este caso corresponde a bandas definidas por los percentiles 10 en la inferior y 90 en la superior, y el calor liberado acumulado en un intervalo T = 24 horas.

Nuevamente, se realizará un análisis punto a punto de la curva Q en busca de eventos superiores o iguales a $M_w{}^*$dentro de los estados definidos con un tiempo de observación, Δt = 8 horas.

De esta forma, si en el punto de la curva estudiado:

- $Q < BI$ o Q > BS, se define un estado de alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas ocurre algún evento de magnitud superior a $M_w{}^*$, se clasifica como un verdadero positivo (TP).
- $Q < BI$ o Q > BS, se define un estado de alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas no ocurre ningún evento de magnitud superior a $M_w{}^*$, se clasifica como un falso positivo (FP).
- $BI < Q < BS$, se define un estado de no alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas ocurre algún evento de magnitud superior a $M_w{}^*$, se clasifica como un falso negativo (FN).
- $BI < Q < BS$, se define un estado de no alerta. Si dentro de las siguientes 8 horas no ocurre ningún evento de magnitud superior a $M_w{}^*$, se clasifica como un verdadero negativo (TN).

La Figura 4.10 muestra un esquema explicativo del funcionamiento de esta metodología para el indicador, detallado a continuación.

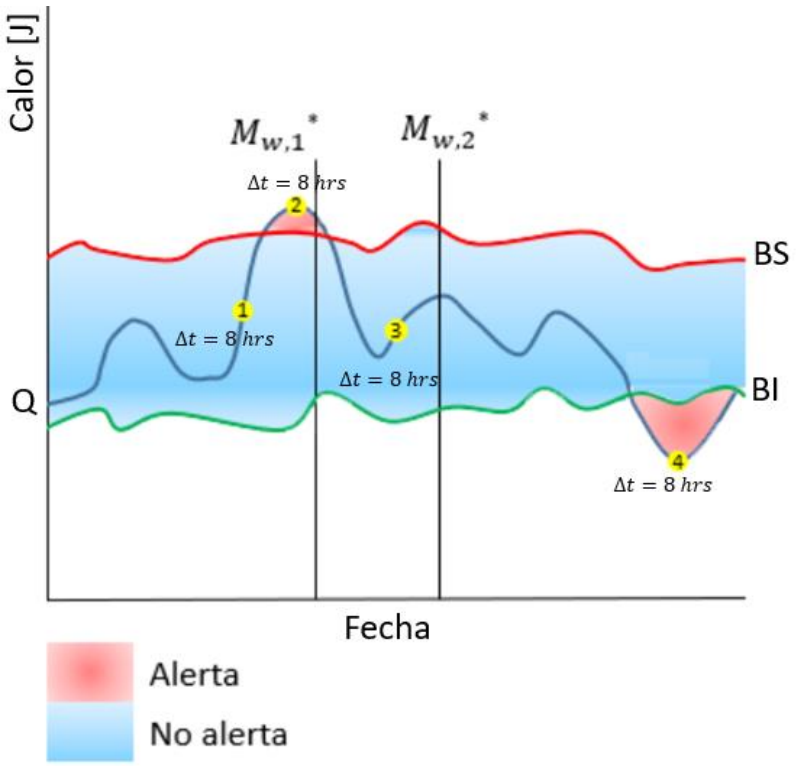

Figura 4.10. Esquema explicativo del funcionamiento del indicador utilizando la metodología de bandas de alerta. La curva azul, corresponde a la curva de calor liberado acumulado, Q en las T horas previas desde la ocurrencia del evento, la curva roja corresponde a la banda superior, BS, y la curva verde corresponde a la banda inferior, BI.

Existen 4 escenarios posibles al momento de revisar cada punto de la curva Q:

- El punto 1 de la curva Q se encuentra en un estado de no alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs no se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud significativa (> $M_w{}^*$) por lo que el indicador clasifica esta instancia como verdadero negativo (TN).
- El punto 2 de la curva Q se encuentra en un estado de alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud $M_{w,1}{}^* > M_w{}^*$ por lo que el indicador clasifica esta instancia como verdadero positivo (TP).
- El punto 3 de la curva Q se encuentra en un estado de no alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud $M_{w,2}{}^* > M_w{}^*$ por lo que el indicador clasifica esta instancia como falso negativo (FN).

- El punto 4 de la curva Q se encuentra en un estado de alerta. Dentro del tiempo de observación Δt = 8 hrs no se registra la ocurrencia de evento sísmico de magnitud significativa (> ${M_w}^*$) por lo que el indicador clasifica esta instancia como falso positivo (FP).

Luego de recorrer la curva completa, se procederá a realizar nuevas mediciones variando el parámetro ${M_w}^*$ y el intervalo T.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados del desempeño del indicador para ambas metodologías desarrolladas.

5.1 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO

En primer lugar, se observa el comportamiento del indicador para distintos valores de $M_w{}^*$y como afecta el intervalo T.

Si bien, en la Figura 5.1 no se observa una tendencia clara, se pueden observar algunos valores con $T = 24$ horas con un buen *"tradeoff"* entre TPR y FPR, presentando altos TPR a la vez que sus FPR son bajos. Para periodos de $T = 36$ horas y $T = 48$ horas, se observan simultáneamente altos TPR y FPR. El detalle de las tablas de contingencia generadas se encuentra en los Anexos 9.1, 9.2 y 9.3.

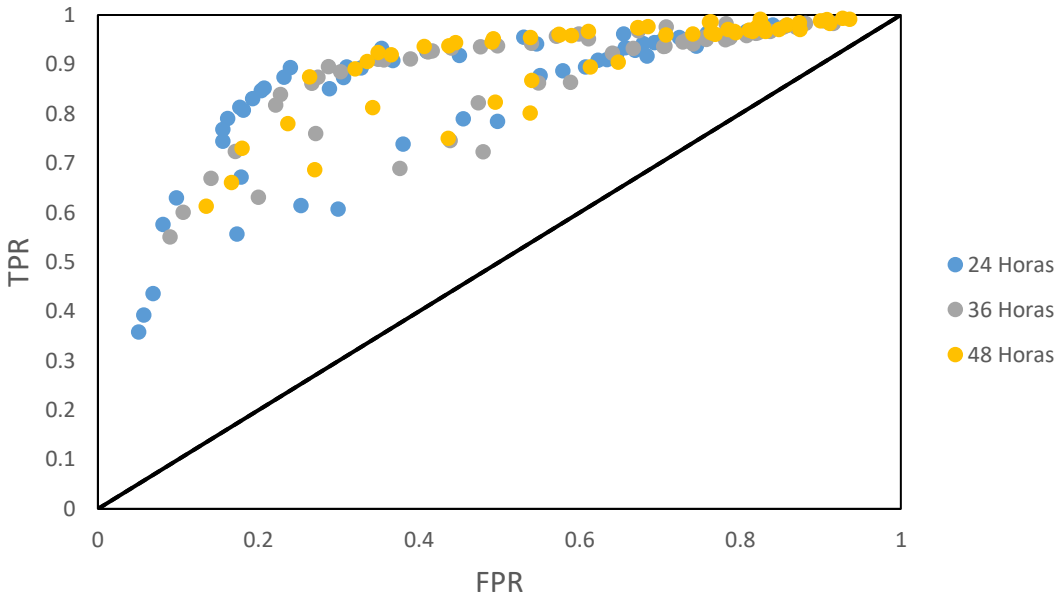

Figura 5.1. Gráfica ROC del comportamiento del indicador y la influencia del intervalo T en este.

Por otra parte, se presenta una gráfica ROC complementaria la cual muestra la influencia del parámetro $M_w{}^*$ en el desempeño del indicador independiente del intervalo T.

Como se observa claramente en la Figura 5.2, todos los resultados obtenidos presentaron un desempeño mejor que aleatorio al encontrarse por sobre la diagonal. En particular, los valores de $M_w{}^*$ entre 1.5 y 2 muestra un mejor *"tradeoff"* entre TPR y FPR. Haciendo énfasis en estos valores, podemos observar el parámetro ACC para cada medición y como este se ve afectado por el parámetro Q^* para distintos valores de intervalo T.

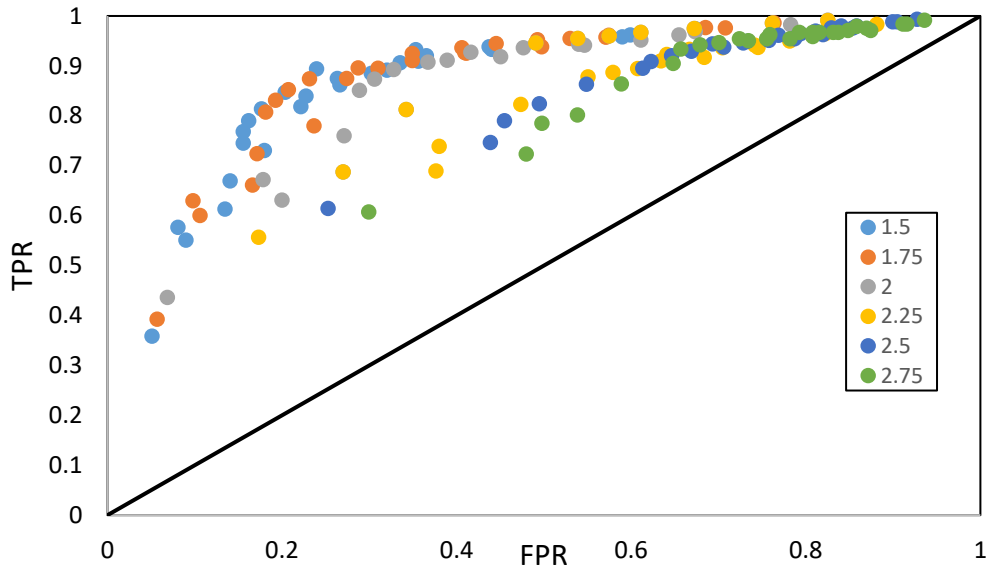

Figura 5.2. Gráfica ROC de los indicadores con la variación del parámetro $M_w{}^*$.

En la Figura 5.3, se observa que la exactitud del indicador presenta valores sobre 0.5 para prácticamente cualquier valor de Q^*. Además, los valores de ACC tienden a ir en aumento con el aumento del intervalo T para valores de $M_w{}^*$= 1.5 y $M_w{}^*$= 1.75, y tiende a disminuir para $M_w{}^*$= 2. Por otra parte, en general, ACC disminuye con el aumento del parámetro Q^*.

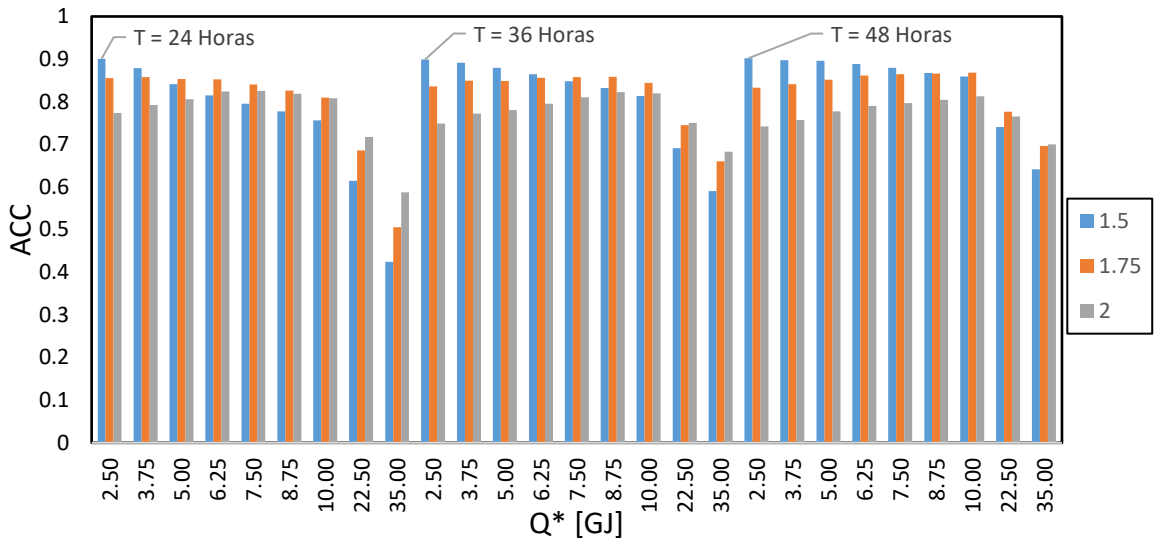

Figura 5.3. Exactitud ACC de los indicadores relacionado con el parámetro Q^* para distintos valores de $M_w{}^*$ y el intervalo T.

En la Figura 5.4, podemos observar que los mejores valores de PSS sobrepasan el valor de 0.6 siendo aquellas mediciones realizadas con un valor de $M_w{}^*$= 1.5 y $M_w{}^*$= 1.75.

Al aumentar el valor del intervalo T el valor máximo de PSS se alcanza con mayores valores de Q^* y $M_w{}^*$. Así mientras el máximo valor de PSS para $M_w{}^*$= 1.5 y T = 24 horas se alcanza con un $Q^* = 3.75$ [GJ], el máximo valor de PSS para un $M_w{}^*$= 2 y T= 48 horas se alcanza con un $Q^* = 22.5$ [GJ]. Este valor de PSS además va disminuyendo con el aumento de $M_w{}^*$y T.

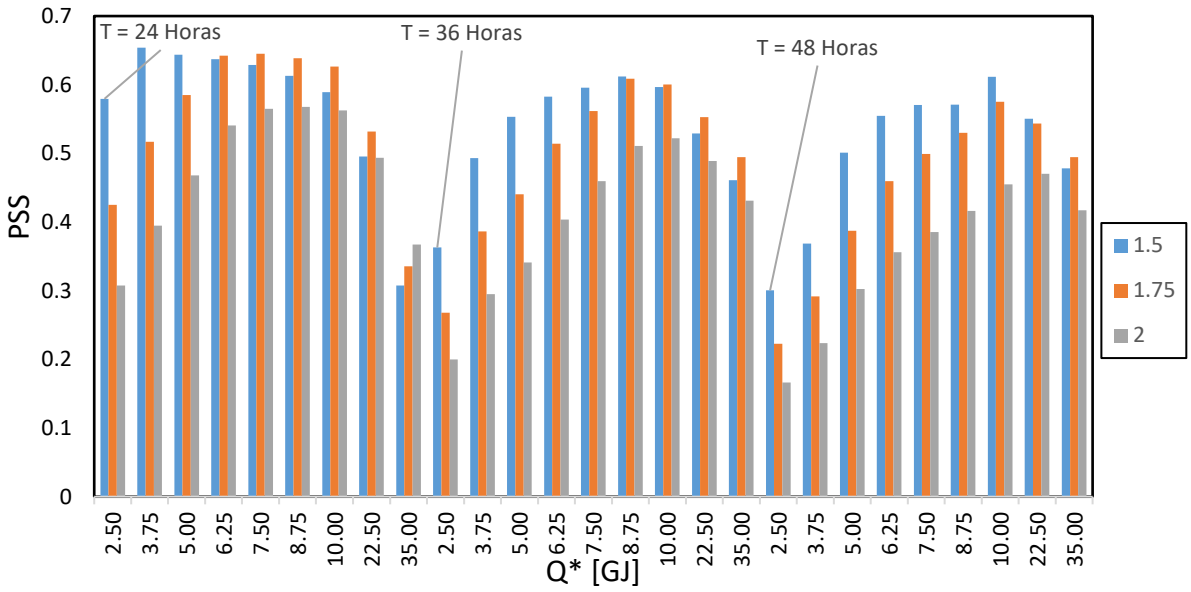

Figura 5.4. PSS de los indicadores relacionado con el parámetro Q^* para distintos valores de $M_w{}^*$ y el intervalo T.

En particular, se encontró que el PSS y el índice ACC fueron más altos cuando $M_w{}^*$ estuvo en el rango 1.5-1.75 y Q^* entre 3.75 [GJ] y 10 [GJ] independiente del intervalo T.

En la Tabla 5.1 se observan aquellos parámetros con mejores PSS. Para un mayor detalle se pueden observar sus respectivas tablas de contingencia en el Anexo 9.4

Tabla 5.1. Parámetros con los que se obtuvieron los mejores PSS para esta metodología.

Q^* [GJ]	T [hr]	$M_w{}^*$	PSS	Q^* [GJ]	T [hr]	$M_w{}^*$	PSS
3.75	24	1.5	**0.6542**	8.75	24	1.75	**0.6384**
5.00	24	1.5	**0.6335**	8.75	36	1.5	**0.6120**
6.25	24	1.5	**0.6370**	8.75	36	1.75	**0.6088**
6.25	24	1.75	**0.6425**	10	24	1.75	**0.6263**
7.50	24	1.5	**0.6287**	10	36	1.75	**0.6005**
7.50	24	1.75	**0.6451**	10	48	1.5	**0.6114**
8.75	24	1.5	**0.6129**				

5.2 BANDAS DE ALERTA

Los resultados fueron obtenidos a partir de la variación de los percentiles en ambas bandas, el valor de $M_w{}^*$ y el intervalo T.

En primer lugar, variando los valores de la banda superior entre los percentiles 85, 90, 95 y la banda inferior entre los percentiles 5, 10 y 15 se graficaron sus TPR y FPR, como se observa en la Figura 5.5, para valores de $M_w{}^*$ entre 1.5, 1.75 y 2, y con distintos valores del intervalo T (24, 36 y 48 horas). Se tomaron estos valores de $M_w{}^*$ debido a los resultados graficados en la Figura 5.2.

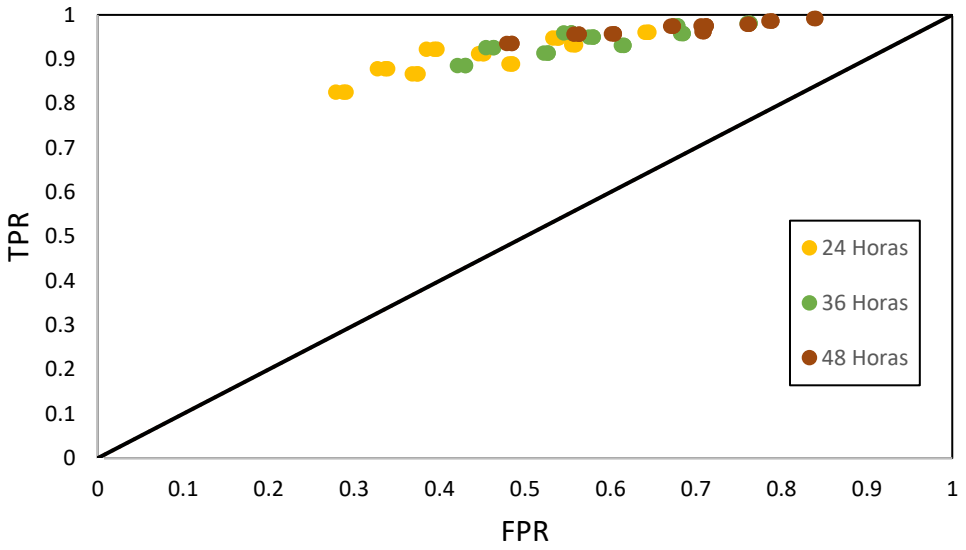

Figura 5.5. Gráficas ROC de los indicadores clasificados según el tiempo utilizado en el intervalo T.

En la Figura 5.5 se observa que todos los resultados se encuentran sobre la diagonal indicando un comportamiento mejor que aleatorio para cada iteración. En tanto, en la Figura 5.6 se hace un énfasis en los resultados obtenidos con un intervalo de calor acumulado de T = 24 horas dado que este muestra ser el parámetro con mejor desempeño.

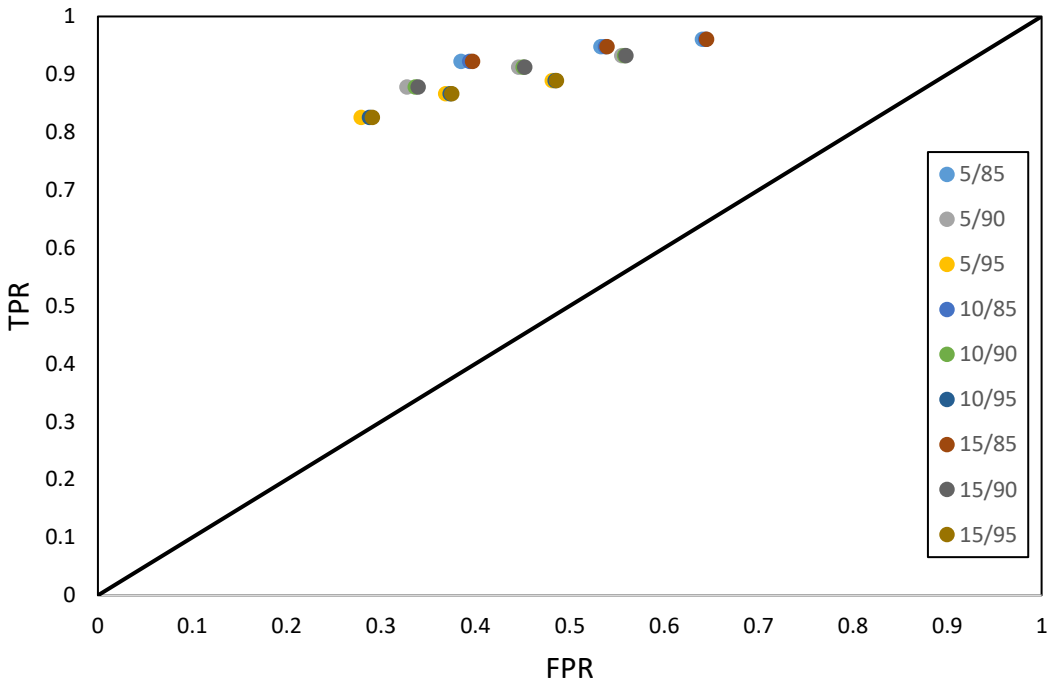

Figura 5.6. Gráfica ROC obtenida para un calor acumulado en un intervalo $T = 24\ horas$ para las distintas combinaciones de percentiles en las bandas y para valores de $M_w{}^*$de 1.5, 1.75 y 2.

En la Figura 5.6 se observa que los valores de TPR varían principalmente alrededor de 0.90, existiendo un rango más amplio en los valores de FPR. Para comparar directamente el desempeño de las distintas combinaciones de percentiles de las bandas y relacionarlo con el parámetro $M_w{}^*$, en la Figura 5.7 se presentan sus valores de PSS.

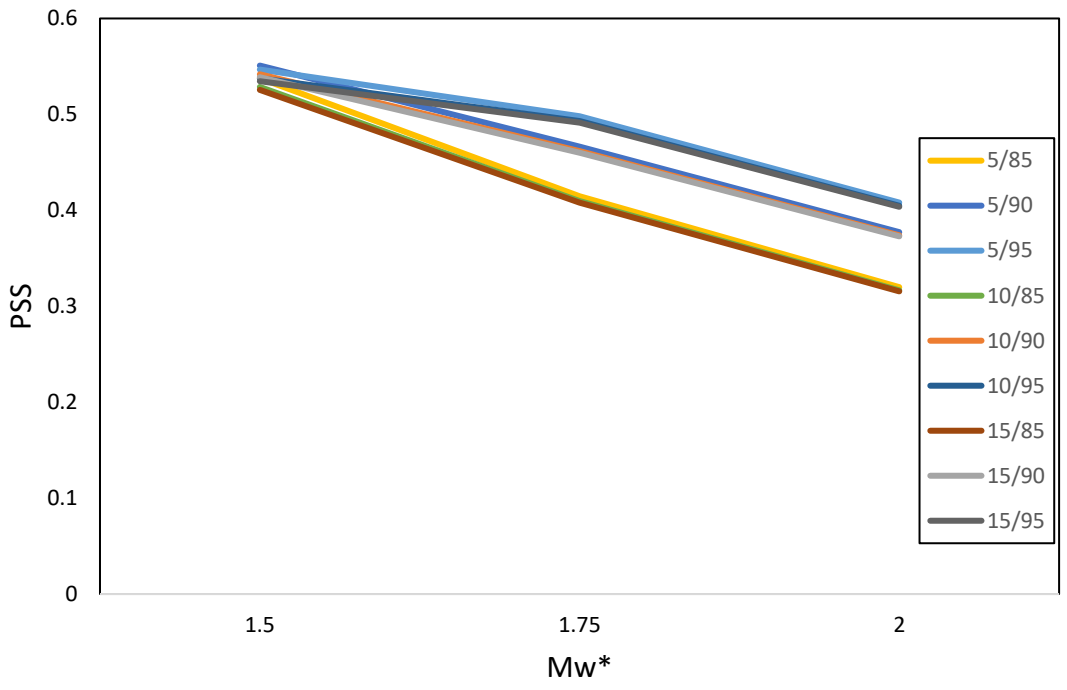

Figura 5.7. Valores de PSS para las distintas combinaciones de percentiles y valores $M_w{}^*$de 1.5; 1.75 y 2 y con un calor de acumulado en un intervalo de T = 24 horas.

Se puede observar una relación de proporcionalidad indirecta entre el PSS y el $M_w{}^*$para todas las combinaciones de bandas. Los valores de mejor PSS son aquellos en los que se utilizó un valor de $M_w{}^*$= 1.5 por lo que para ellos se detalla su ACC en la Figura 5.8.

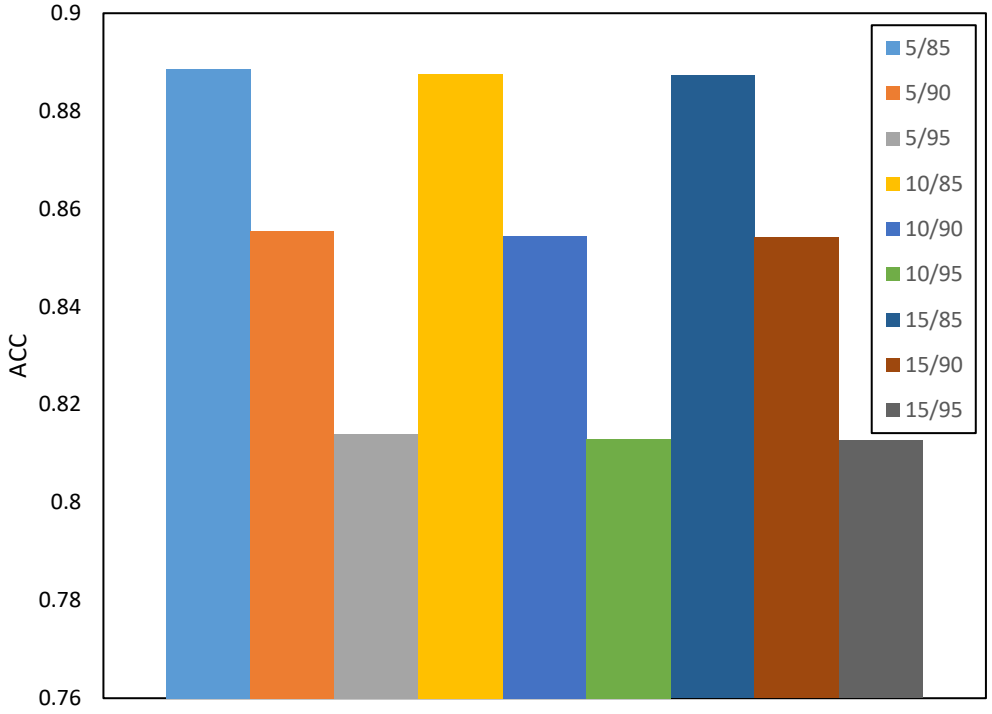

Figura 5.8. Valores de ACC para las distintas combinaciones de percentiles con un M_w^* igual a 1.5 con un intervalo de calor acumulado de 24 horas.

Se observa que los resultados con mayor índice de exactitud ACC son aquellos en los que la banda superior corresponde al percentil 85 sin existir prácticamente diferencias cuando el valor del percentil de la banda inferior varía**.** Además, se muestra un comportamiento simétrico de ACC controlado por el percentil de la banda superior.

Tabla 5.2. Tablas de contingencia de las iteraciones con valores PSS más altos.

Percentiles Banda	M_w^*	**TP**	**FP**	**TN**	**FN**	**TPR**	**FPR**	**PSS**	**ACC**
5-85	1.5	2453	127	203	206	0.923	0.385	0.538	0.889
5-90	1.5	2335	108	222	324	0.878	0.327	0.551	0.855
5-95	1.5	2195	92	238	464	0.825	0.279	0.547	0.814
10-85	1.5	2453	130	200	206	0.923	0.394	0.529	0.888
10-90	1.5	2335	111	219	324	0.878	0.336	0.542	0.854
10-95	1.5	2195	95	235	464	0.825	0.288	0.548	0.813
15-85	1.5	2453	131	199	206	0.923	0.397	0.526	0.887
15-90	1.5	2335	112	218	324	0.878	0.339	0.539	0.854
15-95	1.5	2195	96	234	464	0.825	0.291	0.535	0.813

Los 9 indicadores presentados en la Tabla 5.2 son los que obtuvieron valores de PSS más altos, los cuales superaron 0.500. El resto de las Tablas de contingencia obtenidas se pueden observar en los Anexos 9.5, 9.6 y 9.7 obtenidas a partir de las fórmulas presentadas en la Figura 2.2.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

6.1 DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS

Como se mencionó anteriormente, los datos del catálogo no representan una distribución simétrica. Posterior al evento M_L = 3.7 (16 de diciembre de 2009) se procedió a aumentar el número de sismómetros en la red sísmica añadiendo 6 sismómetros verticales a partir de enero de 2010. Al mismo tiempo, se experimentó un aumento en la sismicidad llegando a una tasa de 18.6 eventos registrados por día, sin embargo, estudios realizados descartaron que este aumento se debiera al crecimiento de la red dado que el mismo aumento de sismicidad se experimentó en otros paneles monitoreados por redes que no fueron modificadas (Kozlowska, et al., 2016). Esta distribución afecta a los resultados obtenidos debido al funcionamiento propio del indicador. El funcionamiento del indicador, al utilizar valores acumulados en el tiempo, se verá afectado a la distribución de datos diarios la cual aumenta con el tiempo y se dispara a partir de la actualización de la red sísmica.

Se concluyó que el evento M_L = 3.7 se produjo cuando el frente de avance, el cual iba de norte a sur, alcanzó al eje Sinclinal de Bytom, el cual se encontraba perpendicular al frente de avance. Este evento pudo haber influido en el área tectónicamente vulnerable cercana a la veta explotada y de esta forma el aumento de sismicidad posterior al evento se vio desencadenado por la explotación en curso, pero controlado por aspectos tectónicos y geológicos del sector (Kozlowska, et al., 2016).

Finalmente, es importante destacar que para obtener un mejor entendimiento de la influencia de la distribución de los datos en el desempeño del indicador es necesario comparar con un registro de la sismicidad histórica en la mina. De esta forma, se comprenderá de mejor manera que porción de los datos corresponde a un régimen de sismicidad “normal” o vinculado a la sismicidad típica de la zona. Esto también permitirá extrapolar la sismicidad a partir de los eventos registrados dando la posibilidad del uso de un catálogo sísmico de mayor extensión.

6.2 CALOR LIBERADO ACUMULADO CRÍTICO

Como se observa en la Figura 5.3 el comportamiento de ACC está relacionado con el intervalo T y con el parámetro Q^*. Al aumentar el tiempo que considera el intervalo T se genera un aumento en los valores de la curva Q generando a su vez que una mayor cantidad de estados de alerta (Q>Q^*) aumentando así el número de instancias clasificadas como TP y una disminución de instancias clasificas como TN. Sin embargo, el aumento de TP tiene mayor impacto en ACC que la disminución de TN (ambos parámetros influyen directamente como se puede observar en la definición de "*accuracy*" ACC en la Figura 2.2) debido a que TN corresponde a una parte minoritaria en la cantidad de aciertos (TN+TP) -ver Anexo 9.8-. En el mismo Anexo 9.8 se puede observar que a medida que aumenta el valor de Q^* el porcentaje de TN también aumenta, por lo que su disminución producto de un aumento de T tiene un mayor impacto en ACC explicándose de esta forma lo observado en la Figura 5.3 entre Q^* y ACC.

El análisis del desempeño del indicador con la metodología de calor liberado acumulado crítico Q^* arrojó que para valores de ${M_w}^*$ entre 1.5 y 1.75 se obtenían los valores más altos de PSS y ACC. Por otra parte, el PSS alcanza sus valores máximos cuando el parámetro Q^* se encuentra entre 3.75 [GJ] y 10 [GJ] siendo todos estos valores sobre 0.60.

Dentro de este rango de Q^*, las mediciones presentaron generalmente ACC mayores a 0.80 como se observa en el Anexo 9.4. A simple vista es posible visualizar que los parámetros que alcanzaron mejor desempeño fueron Q^* =5 [GJ], ${M_w}^*$ = 1.5 y T = 24 horas. Sin embargo, además del PSS y ACC, que sirven como parámetros de comparación directa entre las distintas iteraciones, es necesario realizar otras consideraciones al momento de determinar cuando son los parámetros óptimos para el indicador.

En primer lugar, dentro de todos los eventos sísmicos registrados hubo 4 eventos de magnitud mayor a M_L= 2.8 y en particular uno de magnitud M_L= 3.7 (M_w= 4.00) que pueden considerarse como eventos críticos que el indicador no puede pasar por alto. Con respecto al desempeño del indicador para identificar esos eventos los 13 indicadores que se muestran en la Tabla 5.1 fueron capaces de identificar 3 de esos 4 eventos críticos y todos identificaron el evento de mayor magnitud (M_w= 4.00) tal como se puede observar en la Figura 6.1.

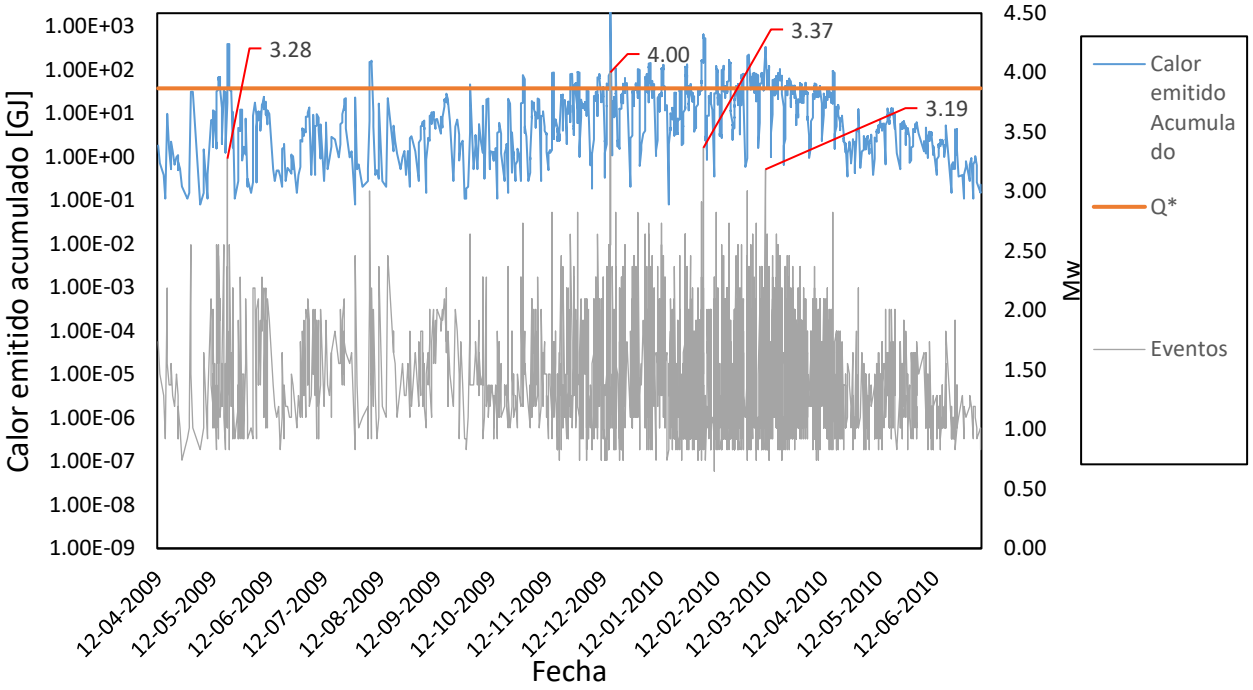

Figura 6.1. Indicador con los parámetros Q^*= 3.75[GJ], $M_w{}^*$ = 1.5 y T = 24 Horas donde se muestra que los 4 eventos críticos de magnitud mayor a 3 ocurren dentro de periodos de alerta, es decir, cuando el calor liberado acumulado era mayor que el calor crítico Q^*.

Por otra parte, es importante considerar el desempeño de los indicadores enfocándose en las métricas FP y TN para determinar cuál indicador es el mejor al momento de determinar estados de no alerta y cuál es el que genera menos estado de alerta erróneos. Esto es importante debido a que se busca generar la menor cantidad de interrupciones posibles dentro de la mina.

Para este análisis en particular se introduce el cálculo del True Negative Rate o TNR para realizar una mejor comparación respecto a estos índices. Este está definido como:

$$TNR = 1 - FPR \tag{14}$$

Tabla 6.1. Métricas FPR y TNR calculadas para los indicadores como mejores PSS y ACC.

Indicador	$\boldsymbol{Q^* \times 10^9}$**[J]**	$\boldsymbol{M_w{}^*}$	**T [Hr]**	**FPR**	**TNR**
1	3.75	1.5	24	0.240	0.760
2	5.00	1.5	24	0.204	0.796
3	6.25	1.5	24	0.177	0.823
4	6.25	1.75	24	0.232	0.768
5	7.50	1.5	24	0.162	0.838
6	7.50	1.75	24	0.207	0.793
7	8.75	1.5	24	0.156	0.844
8	8.75	1.75	24	0.192	0.808
9	8.75	1.5	36	0.228	0.772
10	8.75	1.75	36	0.287	0.713
11	10.00	1.75	24	0.181	0.819
12	10.00	1.75	36	0.274	0.726
13	10.00	1.5	48	0.263	0.737

Como se puede observar en la Tabla 6.1, los indicadores 3, 5 y 7 son lo que presentan mejores valores de TNR y entre estos el indicador 7 es el que tiene el menor valor de FPR siendo este último el que posiblemente presenta los parámetros óptimos para el indicador de un potencial riesgo sísmico pues es el que presentan altos índices de PSS y ACC y, a la vez, genera la menor cantidad de estado de alerta erróneos y la mayor cantidad de estados de no alerta correctos. Cabe mencionar que todos los indicadores de la Tabla 6.1 presentaron buen desempeño tanto al identificar estados de alerta como estados de no alerta en forma acertada.

6.3 BANDAS DE ALERTA

Con respecto a las bandas y basándose en lo expresado en el apartado anterior, se determinó que el rango de valores del parámetro $M_w{}^*$ se acotara entre 1.5 – 2 pues para estos valores los indicadores presentaron mejor desempeño.

Se pudo observar que para un intervalo T de 24 horas los indicadores mostraban un mejor desempeño. También se observa en la Figura 5.7 que los valores tienen un desempeño óptimo con un valor $M_w{}^*$ de 1.5 y que la banda inferior ejerce mayor influencia en el PSS ya que al aumentar el percentil de la banda inferior el PSS tiende a disminuir. Por otra parte, en la Figura 5.8 se observa que la banda superior es la que controla principalmente al parámetro ACC, este disminuye con el aumento del percentil de la banda superior y por contraparte no se ve afectado por la variación en el percentil de la banda inferior.

Definiendo al intervalo T = 24 horas, $M_w{}^*$ = 1.5, y los percentiles de las bandas superior-inferior como 85-5 como los mejores parámetros es natural pensar que el indicador con estas características será el de mejor desempeño, sin embargo, no es el de mejor PSS como se detalla en la Tabla 5.2 y será necesario realizar otras consideraciones al momento de determinar el indicador de mejor desempeño.

Es importante añadir que el comportamiento simétrico del ACC observado en la Figura 5.8 se explica debido a que los valores obtenidos de la tabla de contingencia se comportan en forma pareada. En primer lugar, al variar la banda superior para un mismo percentil de la banda inferior los cambios generados en los resultados son del tipo FN-TP o TN-FP, es decir, instancias que el indicador había clasificado como FN al variar el percentil de la banda superior pasan ser clasificados como TP y de la misma forma con el otro par. Sin embargo, la disminución de TP puede llegar a ser hasta 10 veces mayor que el aumento de TN. Esto provoca que la cantidad de la suma entre TN y TP disminuya para cada indicador sin importar el percentil de la banda inferior disminuyendo el ACC debido a como se define este valor lo que se observa en la Figura 2.2. Por otra parte, si se varía el percentil de la banda inferior dejando fijo el valor del percentil de la banda superior, la cantidad de instancias clasificadas como TP no cambia, mientras que la cantidad de TN experimenta una variación

ínfima (hasta 4 unidades de TN de diferencia entre distintas mediciones) de esta manera explicando la nula influencia de la banda inferior en el parámetro ACC.

Además, y en forma análoga a lo que se realizó en el apartado anterior, es importante determinar si los indicadores de mejor desempeño fueron capaces de identificar los eventos sísmicos mayores que ocurrieron durante el periodo abarcado en la base de datos (M_L > 2.8).

Los 9 indicadores enumerados en la Tabla 5.2 fueron capaces de identificar 3 de los 4 eventos y todos lograron identificar el sismo de mayor magnitud. Esto se puede ver ejemplificado en la Figura 6.2.

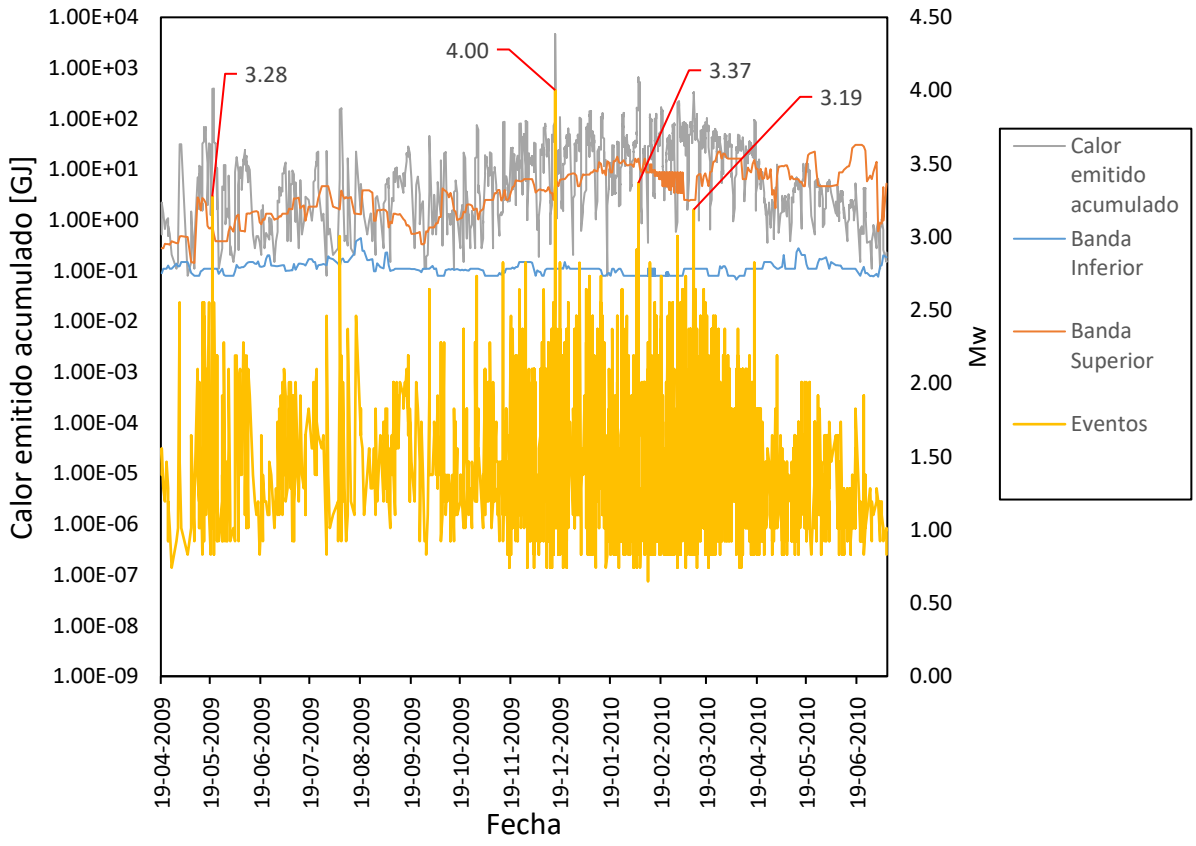

Figura 6.2. Desempeño del indicador con parámetros, M_w^* = 1,5, intervalo T = 24 Horas, banda superior = percentil 95 y banda inferior = percentil 5, identificando estados de alerta durante el acontecimiento de los eventos de mayor magnitud.

Finalmente, es importante realizar una comparación adicional con respecto al comportamiento de los indicadores al momento de identificar estados de alerta erróneos y estados de no alerta correctos. Para ello se procede nuevamente a calcular el TNR.

Tabla 6.2. Métricas FPR y TNR calculadas para los indicadores como mejores PSS y ACC.

Indicador	**Percentiles bandas**	M_w^*	**FPR**	**TNR**
1	5-85	1.5	**0.385**	**0.615**
2	5-90	1.5	**0.327**	**0.673**
3	5-95	1.5	**0.279**	**0.721**
4	10-85	1.5	**0.394**	**0.606**
5	10-90	1.5	**0.336**	**0.664**
6	10-95	1.5	**0.289**	**0.711**
7	15-85	1.5	**0.397**	**0.603**
8	15-90	1.5	**0.339**	**0.661**
9	15-95	1.5	**0.291**	**0.709**

Como se observa en la Tabla 6.2, los indicadores presentan un comportamiento similar al momento de identificar estados de alerta erróneos o estados de no alerta acertados inferior a 0.500 destacando los indicadores 3, 6 y 9 con los mayores valores de TNR que por contraparte son los que tiene menor ACC. Además, el indicador 2 presenta cuarto valor más alto de TNR siendo además el indicador con mayor PSS como se observa en la Tabla 5.2.

Cabe mencionar que tanto en la metodología de calor liberado acumulado crítico como en las bandas de alerta ninguno de los indicadores logró identificar el primer evento sísmico mayor del catálogo dentro de un estado de alerta. Este evento corresponde a uno ocurrido dentro de la primera porción de datos más específicamente el 20 de mayo de 2009, encontrándose dentro del periodo en donde los registros de la base de datos utilizada presentan un promedio menor a 10 datos diarios lo que probablemente influyó en el desempeño del indicador durante ese periodo. Esto se debe a que la explotación de la veta

había iniciado recientemente, el frente no se encontraba cercano al eje Sinclinal de Bytom aun y había pocos eventos acumulados a la fecha.

6.4 CONTEXTO REGIONAL

Es importante destacar, que los resultados obtenidos se encuentran enmarcados en un contexto regional específico, es decir, a la geología y litoestratigrafía de la USCB. Los valores obtenidos de calor liberado están vinculados a la roca predominante (en este caso arenisca) y además la actividad sísmica propia de la zona está altamente influenciada por las estructuras geológicas presentes.

Como se mencionó anteriormente, los eventos ocurridos en la mina son resultado tanto de la propia actividad minera, que indujo cambios en el campo de esfuerzos, como de las características tectónicas de la zona. Los eventos de mayor magnitud están principalmente vinculadas a la cercanía del frente de avance con las principales estructuras presentes (Eje Sinclinal de Bytom).

Por otra parte, el indicador en su funcionamiento está vinculado simplemente a la cantidad de energía liberada, sin profundizar en el mecanismo de fallamiento asociado a cada evento. Sin embargo, se podría buscar una relación, dependiendo de la energía y/o ubicación del evento, con los tipos de eventos descritos por Stec (2007). De esta forma, se podría observar cómo actúa el indicador frente a distintos mecanismos de falla.

Es importante mencionar que para aplicar este indicador en distintos ambientes mineros-geológicos-tectónicos será necesario calibrar el indicador. Trabajar en un contexto distinto tendrá por resultado distinto regímenes sísmicos, distinta cantidad de fracturamiento y, por ende, una distinta cantidad de calor acumulado lo que puede llevar a distintos parámetros que entreguen un desempeño del indicador, así como distintos resultados.

Finalmente, agregar que el trabajo aquí realizado utilizado un modelo simplificado de la caída de esfuerzo y de la relación entre el acontecimiento de eventos sísmicos y el calor generado por la microsismicidad. Si bien, es un modelo suficiente para una primera aproximación para la introducción de este indicador sísmico es necesario establecer que habrá un error inherente a la utilización de este modelo y que es importante estudiar el comportamiento del indicador basándose en modelos más complejos.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dentro de este trabajo se estudió el desempeño del indicador sísmico calor liberado utilizando una base de datos de eventos sísmicos registrados durante 2009 y 2010 en la mina de carbón Bobrek en Polonia durante la explotación del panel n°3 de la veta de carbón 503.

Las metodologías empleadas permitieron la evaluación del desempeño del indicador sísmico obteniendo resultados dispares, pero prometedores. En general se logró un desempeño del indicador mejor que aleatorio en todas las iteraciones realizadas. Esto se observa en que los indicadores de ambos métodos identificaron un 75% de los eventos considerables. Este desempeño puede ser mejorado si se realiza un trabajo similar utilizando un catálogo de datos continuo y mayor extensión.

En el caso del calor liberado acumulado crítico se logró determinar un valor óptimo para el parámetro $Q^* = 8.75$ [GJ] los cuales obtuvieron los mejores resultados. Además, el intervalo T se definió como óptimo de 24 horas y ${M_w}^*$ = 1.5.

Definiendo el estado de alerta cuando el calor liberado acumulado superara 5.00 [GJ] el indicador sísmico logró un valor de PSS = 0.644 y ACC = 0.841. Además, existieron otros 12 indicadores que presentaron desempeños similares los que pueden ser tomados en cuenta en trabajos futuros destacando aquel con un parámetro $Q^* = 8.75$ [GJ], T = 24 horas y ${M_w}^*$ = 1.5 que agregado a los altos valores obtenidos de PSS y ACC obtuvo la menor tasa de estado de alerta erróneos.

Con respecto a la metodología de bandas de alerta se concluyó que, dentro del rango utilizado, el percentil de la banda inferior no afecta a la exactitud del indicador lo que se grafica en el parámetro ACC a diferencia de la banda superior el cual al aumentarse generaba una disminución en el ACC. Por otra parte, el PSS tiende a disminuir cuando el percentil de la banda inferior aumenta obteniendo sus mejores valores cuando el percentil de la banda inferior fue 5. La banda inferior no influye en la exactitud del indicador debido a que la curva Q prácticamente nunca se encontró bajo la banda inferior, siendo menos del 1% de los estados de alerta generados por esta condición ($Q < BI$).

En particular, se definió que, utilizando la metodología de bandas de alerta, los parámetros óptimos para el indicador sísmico corresponden a un intervalo T = 24 horas, percentiles banda superior-banda inferior, 5-90 y un $M_w{}^*$ = 1.5. El indicador sísmico que utilizó estos parámetros obtuvo un PSS = 0.551 y un ACC = 0.855 donde además se debe mencionar que otros 8 indicadores presentaron desempeños similares pudiendo tomarse en cuenta para trabajos posteriores.

Al momento de comparar ambas metodologías se concluye que la metodología del calor liberado acumulado crítico presento mejores resultados que la metodología de bandas, sin embargo, se recomienda para trabajos futuros el afinar esta metodología variando otros parámetros como por ejemplo el tiempo de observación de eventos sísmicos relevantes, Δt, definido en este trabajo en 8 horas.

Además, dentro de la posibilidad de trabajos futuros, se debe realizar una nueva forma de contabilizar el calor liberado acumulado, esta vez realizarlo en forma continua donde exista un ΔT constante entre cada registro de calor acumulado realizado. Para ello, probablemente, será necesario utilizar una base de datos más extensa (10-15 años), con una menor dispersión entre los datos para de esta forma poder estudiar un funcionamiento homogéneo del indicador durante todo el periodo de tiempo estudiado.

Finalmente, queda abierta la posibilidad de utilizar la metodología descrita en este trabajo y someterla a catálogos pertenecientes a minas que se encuentran en distintas regiones del mundo con sus características geológicas y geomecánicas propias como pudiera ser en Chile. De esta forma, aprovechar de seguir extendiendo el vínculo entre la academia y la industria donde está última fomente el desarrollo de la investigación en las universidades con el objetivo de resolver o mejorar problemáticas que se ocurren hoy en día en la minería nacional.

CAPÍTULO 8. REFERENCIAS

Abercrombie, R., & Leary, P. (1993). Source parameters of small earthquakes recorded at 2.5 km depth, Cajon Pass, southern California: Implications for earthquake scaling. *Geophysical Research Letters*.

Benjamin, J. R. (1968). Probabilistic models for the seismic force design. *Journal of the Structural Division of the ASCE 94(5)*, 1175-1196.

Blake, W., & Hedley, D. G. (2003). *Rockbursts. Case studies from North American Hard-Rock Mines.* Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Debski, W. (2018). Dynamic Stress Drop for Selected Seismic Events at Rudna Cooper Mine, Poland. *Pure Applied Geophysics 175*, 4165-4181.

Dunlop, R., & Gaete, S. (1997). Controlling the induced seismicity at El Teniente Mine: the Sub-6 sector case history. *Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines.* Cracovia, Polonia.

Egan, J. P. (1975). *Signal detection theory and ROC analysis, Series in Cognition and Perception.* New York: Academic Press.

Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field on an ellipsoidal inclusion and related problems. *Proceedings of the Royal Soc. London*, 376-396.

Fawcett, T. (2006). Introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters, Volume 27, Issue 8*, 861-874.

Gibowicz, S. J. (1990). The mechanism of seismic events induced by mining A review. En S. J. Gibowicz. Minneapolis: Editor: C. Fairhurst.

Gibowicz, S. J., & Kijko, A. (1994). *An introduction to mining seismology 1st ed.* San Diego: Academic Press.

Grünthal, G., Wahlström, R., & Stromeyer, D. (2009). The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC)-updated and expanded to the last millennium.

Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A Moment Magnitude Scale. *Jounal of Geophysical Research*.

Hasegawa, H. S., Wetmiller, R. J., & Gendzwill, D. J. (1989). Induced seismicity in mines in Canada - an overview. *Pure and Applied Geophysics. Vol 129, Nos 3/4*, 423-453.

Hudyma, M. (2010). *Applied Mine Seismology Concepts and Techniques.* Laurentian University.

IS EPOS. (2017). *Episode: BOBREK*. doi:10.25171/InstGeoph_PAS_ISEPOS-2017-003

Kanamori, H., & Heaton, T. H. (2000). *Microscopic and Macroscopic Physics of Earthquakes.* Pasadena California 91125: Seismological Laboratory, California Institute of Technology.

Kapoor, S. P., & Chauhan, B. C. (2014). Earthquake and Geothermal Energy. *Universal Journal of Geoscience, 2 (5),* 141-151.

Konakova, D., Vejmelkova, E., & Cerny, R. (2013). Thermal properties of selected sandstones, Advances in Modern Mechanical Engineering. 100-104.

Kozlowska, M., & Orlecka-Sikora, B. (2017). Assessment of Quantitative Aftershock Productivity Potential in Mining-Induced Seismicity. *Pure and Applied Geophysics, 174(3),* 925-936.

Kozlowska, M., Orlecka-Sikora, B., Rudzinski, Lukasz, Cielesta, S., & Mutke, G. (2016). Atypical evolution of seismicity patterns resulting from the coupled natural, human-induced and coseismic stresses in a longwall coal mining environment. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 86:*, 5-15.

Leptokaropoulos, K. M., Staszek, M., Cielesta, S., Urban, P., Olszewska, D., & Lizurek, G. (2017). Time-dependent seismic hazard in Bobrek coal mine, Poland, assuming different magnitude distribution estimations. *Acta Geophysica*.

Madariaga, R. (1977). Implications of stress-drop models of earthquakes for the inversion of stress drop from seismic observations. *Pure Applied Physics, 115,* 301-316.

Malek, F., & Leslie, I. F. (2006). *Using seismic data for rockburst re-entry protocol at INCO's Copper Cliff North Mine.*

Marcak, H., & Mutke, G. (2013). Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal of Seismology, 17(4)*, 1139-1148.

Mendecki, J., Szczygiel, J., Lizurek, G., & Teper, L. (2020). Mining-triggered seismicity governed by a fold hinge zone: The Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Engineering Geology 274*.

Mendecki, M. J., Wojtecki, L., & Zuberek, W. M. (2019). Case Studies of Seismic Energy Release Ahead of Underground Coal Mining Before Strong Tremors. *Pure and Applied Geophysics. 176*, 3487-3508.

Mendecki, M., Duda, A., & Idziak, A. (2018). Ground-motion prediction equation and side effect characterization for the central area of the Main Syncline, Upper Silesia Coal Basin, Poland. *Open Geosciences*, 474-483.

Nakata, R., Lumley, D., & Nakata, N. (2015). Introduction to microseismic source mechanisms. *The Leading Edge*.

Nikonov, A. (2008). Seismic pattern in the southeast Baltic region prior to and during Kaliningrad earthquakes in 2004. *Dokl. Earth Sc. 421*, 957-960.

Ogata, Y. (1988). Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point. *Journal of the American Statistical Association*, 83: 9-27.

Ortlepp, W. D. (1992). Invited Lecture: The design of support for the containment of rockburst damage in tunnels - An engineering approach. *Proceedings of Rock Support and Underground Construction* (págs. 593-609). Rotterdam: Balkema: editors: P.K. Kaiser and D.R. McCreath.

Peice, C. (1884). The numerical measure of the success of predictions. *Science 4*, 453-454.

Potvin, Y., Hudyma, M., & Jewell, R. J. (2000). Rockburst and seismic activity in underground australian mines - an introduction to a new research project.

Richardson, E., & Jordan, T. (2002). Seismicity in deep gold mines of South Africa: implications for tectonic earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5).

Richter, C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America, 25*, 1-32.

Sammarco, J., Kohler, J., Morley, L., & Novak, T. (1997). Safety issues and the use software-controlled equipment in the mining industry., (págs. 2084-2090).

SERNAGEOMIN. (2017). *Balance Nacional de Accidentabilidad Minera de 2016.* Depto. Seguridad Minera y Fiscalización.

SERNAGEOMIN. (2020). *Accidentabilidad Minera año 2019.* Seguridad Minera.

Shcherbakov, R., Turcotte, D. L., Rundle, J. B., Tiampo, K. F., & Holliday, J. (2010). Forecasting the locations of future large earthquakes: An analysis and verification. 743-749.

Sibson, R. H. (1977). Kinetic shear resistance. *Pure and Applied Geophysics*, 387-400.

Stec, K. (2007). Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journey International, Volume 168, Issue 2*, 757-768.

Swets, J. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science 240*, 1285-1293.

Swets, J., Dawes, R., & Monahan, J. (2000). Better decisions through science. *Scientific American 283*, 82-87.

Vallejos, J. A., & McKinnon, S. D. (2008). Guidelines for development of re-entry protocols. *Proceeding of the 42nd US Rock Mechanics Symposium*, (págs. 08-97). San Francisco, California.

Vallejos, J. A., Estay, R., Zepeda, R., & Jorquiera, P. (2012). A methodology for evaluating the performance of seismic indicators at El Teniente Mine, Codelco Chile. *6th International conference & exhibition on mass mining.* Ontario, Canadá.

van Aswegen, G. (2005). Routine seismic hazard assessment in some South African mines. En *Controlling Seismic Risk - Rockbursts and Seismicity in Mines* (págs. 437-444.). Perth: Australian Centre for Geomechanics: Editors: Y. Potvin, M.R. Hudyma.

Vergara, M. (2021). *Evaluación del desempeño del indicador de agloramiento espacial con datos de sismicidad inducida por minería. [Memoria de titulación para optar al título de Ingeniero Civil de Minas]*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Wojtecki, Ł., Golda, I., & Mendecki, M. (2021). The influence of distant coal seam edges on seismic hazard during longwall mining. *Journal of Seismology*.

CAPÍTULO 9. ANEXOS

9.1 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO T = 24 HORAS

Tabla 9.1. Tabla de contingencias para valores de Q^*entre 2.50 y 5.00 [GJ]

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
2.50	1.5	2483	118	216	179	0.93275733	0.35329341	0.57946391	0.90086782
	1.75	2276	325	288	107	0.95509862	0.53017945	0.42491917	0.85580774
	2	2002	599	316	79	0.96203748	0.65464481	0.30739267	0.77369826
	2.25	1134	1467	351	44	0.96264856	0.80693069	0.15571786	0.49566088
	2.5	579	2022	383	12	0.97969543	0.84074844	0.13894699	0.32109479
	2.75	237	2364	390	5	0.97933884	0.8583878	0.12095104	0.20927904
3.75	1.5	2379	80	254	283	0.89368896	0.23952096	0.654168	0.87883845
	1.75	2208	251	362	175	0.92656316	0.40946166	0.51710149	0.85781041
	2	1959	500	415	122	0.94137434	0.54644809	0.39492625	0.79238985
	2.25	1104	1355	463	74	0.93718166	0.74532453	0.19185713	0.52303071
	2.5	565	1894	511	26	0.95600677	0.78752599	0.16848078	0.35914553
	2.75	234	2225	529	8	0.96694215	0.80791576	0.15902639	0.2546729
5.00	1.5	2255	68	266	407	0.84710744	0.20359281	0.64351462	0.84145527
	1.75	2133	190	423	250	0.89509022	0.30995106	0.58513916	0.85313752
	2	1911	412	503	170	0.91830851	0.45027322	0.46803528	0.80574099
	2.25	1080	1243	575	98	0.91680815	0.68371837	0.23308978	0.5524032
	2.5	561	1762	643	30	0.94923858	0.73264033	0.21659825	0.40186916
	2.75	233	2090	664	9	0.96280992	0.75889615	0.20391377	0.2993992

Tabla 9.2. Tablas de contingencias para valores de Q^* entre 6.25 y 8.75 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
6.25	1.5	2166	59	275	496	0.81367393	0.17664671	0.63702722	0.814753
	1.75	2083	142	471	300	0.87410827	0.23164763	0.64246063	0.85246996
	2	1889	336	579	192	0.90773667	0.36721311	0.54052355	0.82376502
	2.25	1072	1153	665	106	0.91001698	0.63421342	0.27580356	0.57977303
	2.5	558	1667	738	33	0.94416244	0.69313929	0.25102314	0.43257677
	2.75	231	1994	760	11	0.95454545	0.72403776	0.23050769	0.33077437
7.50	1.5	2104	54	280	558	0.79038317	0.16167665	0.62870652	0.79572764
	1.75	2031	127	486	352	0.85228703	0.20717781	0.64510922	0.84012016
	2	1858	300	615	223	0.89283998	0.32786885	0.56497113	0.82543391
	2.25	1054	1104	714	124	0.89473684	0.60726073	0.28747612	0.59012016
	2.5	549	1609	796	42	0.92893401	0.66902287	0.25991114	0.44893191
	2.75	229	1929	825	13	0.94628099	0.70043573	0.24584526	0.3518024
8.75	1.5	2046	52	282	616	0.76859504	0.15568862	0.61290642	0.77703605
	1.75	1980	118	495	403	0.83088544	0.19249592	0.63838952	0.82610147
	2	1818	280	635	263	0.87361845	0.30601093	0.56760752	0.81875834
	2.25	1045	1053	765	133	0.88709677	0.57920792	0.30788885	0.60413885
	2.5	544	1554	851	47	0.92047377	0.64615385	0.27431993	0.46562083
	2.75	228	1870	884	14	0.94214876	0.67901235	0.26313641	0.37116155

Tabla 9.3. Tablas de contingencia para valores de Q^*entre 10.00 y 35.00 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
10.00	1.5	1983	52	282	679	0.74492863	0.15568862	0.58924	0.75600801
	1.75	1924	111	502	459	0.80738565	0.18107667	0.62630898	0.80974633
	2	1771	264	651	310	0.85103316	0.28852459	0.56250857	0.80841121
	2.25	1034	1001	817	144	0.87775891	0.55060506	0.32715385	0.61782377
	2.5	537	1498	907	54	0.90862944	0.62286902	0.28576042	0.48197597
	2.75	226	1809	945	16	0.9338843	0.65686275	0.27702155	0.39085447
22.50	1.5	1534	27	307	1128	0.57625845	0.08083832	0.49542013	0.61448598
	1.75	1501	60	553	882	0.6298783	0.09787928	0.53199902	0.68558077
	2	1398	163	752	683	0.67179241	0.17814208	0.49365033	0.7176235
	2.25	870	691	1127	308	0.7385399	0.38008801	0.35845189	0.66655541
	2.5	467	1094	1311	124	0.79018613	0.45488565	0.33530047	0.59345794
	2.75	190	1371	1383	52	0.78512397	0.49782135	0.28730262	0.52503338
35.00	1.5	954	17	317	1708	0.35837716	0.0508982	0.30747896	0.42423231
	1.75	936	35	578	1447	0.39278221	0.05709625	0.33568596	0.50534045
	2	908	63	852	1173	0.43632869	0.06885246	0.36747623	0.58744993
	2.25	656	315	1503	522	0.55687606	0.17326733	0.38360873	0.7206275
	2.5	363	608	1797	228	0.6142132	0.25280665	0.36140655	0.72096128
	2.75	147	824	1930	95	0.60743802	0.29920116	0.30823685	0.69325768

9.2 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO T = 36 HORAS

Tabla 9.4. Tabla de contingencias para valores de Q^*entre 2.50 y 5.00 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
2.50	1.5	2560	200	134	102	0.96168295	0.5988024	0.36288055	0.89919893
	1.75	2326	434	179	57	0.97608057	0.70799347	0.2680871	0.83611482
	2	2044	716	199	37	0.98222009	0.78251366	0.19970643	0.74866489
	2.25	1158	1602	216	20	0.98302207	0.88118812	0.10183395	0.45861148
	2.5	584	2176	229	7	0.98815567	0.9047817	0.08337396	0.27136182
	2.75	238	2522	232	4	0.98347107	0.9157589	0.06771218	0.15687583
3.75	1.5	2484	147	187	178	0.93313298	0.44011976	0.49301322	0.89152203
	1.75	2281	350	263	102	0.95719681	0.57096248	0.38623433	0.84913218
	2	2015	616	299	66	0.96828448	0.67322404	0.29506043	0.77236315
	2.25	1136	1495	323	42	0.96434635	0.82233223	0.14201412	0.48698264
	2.5	577	2054	351	14	0.97631134	0.85405405	0.12225728	0.30974633
	2.75	236	2395	359	6	0.97520661	0.86964415	0.10556246	0.19859813
5.00	1.5	2421	119	215	241	0.90946657	0.35628743	0.55317914	0.87983979
	1.75	2235	305	308	148	0.93789341	0.49755302	0.44034039	0.8487984
	2	1981	559	356	100	0.95194618	0.61092896	0.34101722	0.78004005
	2.25	1119	1421	397	59	0.94991511	0.78162816	0.16828695	0.50600801
	2.5	569	1971	434	22	0.96277496	0.81954262	0.14323234	0.33477971
	2.75	234	2306	448	8	0.96694215	0.83732752	0.12961463	0.22763685

Tabla 9.5. Tabla de contingencias para valores de Q^* entre 6.25 y 8.75 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
6.25	1.5	2356	101	233	306	0.88504884	0.30239521	0.58265363	0.8641522
	1.75	2205	252	361	178	0.92530424	0.41109299	0.51421125	0.8564753
	2	1963	494	421	118	0.94329649	0.53989071	0.40340578	0.79572764
	2.25	1109	1348	470	69	0.94142615	0.74147415	0.199952	0.52703605
	2.5	564	1893	512	27	0.95431472	0.78711019	0.16720453	0.35914553
	2.75	232	2225	529	10	0.95867769	0.80791576	0.15076193	0.25400534
7.50	1.5	2295	89	245	367	0.86213373	0.26646707	0.59566667	0.84779706
	1.75	2170	214	399	213	0.91061687	0.34910277	0.5615141	0.85747664
	2	1948	436	479	133	0.93608842	0.47650273	0.45958569	0.81008011
	2.25	1103	1281	537	75	0.93633277	0.70462046	0.23171231	0.54739653
	2.5	562	1822	583	29	0.95093063	0.75758836	0.19334227	0.38217623
	2.75	231	2153	601	11	0.95454545	0.78177197	0.17277349	0.2777036
8.75	1.5	2235	76	258	427	0.83959429	0.22754491	0.61204938	0.83210948
	1.75	2135	176	437	248	0.8959295	0.28711256	0.60881694	0.85847797
	2	1930	381	534	151	0.92743873	0.41639344	0.51104529	0.82242991
	2.25	1099	1212	606	79	0.93293718	0.66666667	0.26627051	0.56909212
	2.5	559	1752	653	32	0.94585448	0.72848233	0.21737216	0.40453939
	2.75	231	2080	674	11	0.95454545	0.75526507	0.19928039	0.30206943

Tabla 9.6. Tablas de contingencia para valores de Q^*entre 10.00 y 35.00 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
10.00	1.5	2178	74	260	484	0.81818182	0.22155689	0.59662493	0.81375167
	1.75	2084	168	445	299	0.87452791	0.27406199	0.60046592	0.8441255
	2	1896	356	559	185	0.91110043	0.38907104	0.52202939	0.8194259
	2.25	1087	1165	653	91	0.92275042	0.64081408	0.28193634	0.58077437
	2.5	554	1698	707	37	0.93739425	0.70602911	0.23136514	0.42089453
	2.75	230	2022	732	12	0.95041322	0.73420479	0.21620843	0.32109479
22.50	1.5	1783	47	287	879	0.66979715	0.14071856	0.52907858	0.69092123
	1.75	1725	105	508	658	0.72387747	0.17128874	0.55258872	0.7453271
	2	1582	248	667	499	0.76021144	0.27103825	0.48917319	0.75066756
	2.25	969	861	957	209	0.82258065	0.47359736	0.34898329	0.64285714
	2.5	510	1320	1085	81	0.86294416	0.54885655	0.31408761	0.5323765
	2.75	209	1621	1133	33	0.86363636	0.5885984	0.27503796	0.44793057
35.00	1.5	1466	30	304	1196	0.55071375	0.08982036	0.46089339	0.59078772
	1.75	1431	65	548	952	0.60050357	0.10603589	0.49446768	0.6605474
	2	1313	183	732	768	0.63094666	0.2	0.43094666	0.68257677
	2.25	812	684	1134	366	0.6893039	0.37623762	0.31306628	0.64953271
	2.5	441	1055	1350	150	0.74619289	0.43866944	0.30752345	0.59779706
	2.75	175	1321	1433	67	0.7231405	0.47966594	0.24347456	0.53671562

9.3 TABLAS DE CONTINGENCIA CALOR ACUMULADO CRÍTICO T = 48 HORAS

Tabla 9.7. Tabla de contingencias para valores de Q^*entre 2.50 y 5.00 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
2.50	1.5	2593	225	109	69	0.97407964	0.67365269	0.30042694	0.90186916
	1.75	2350	468	145	33	0.98615191	0.7634584	0.22269351	0.83277704
	2	2063	755	160	18	0.99135031	0.82513661	0.1662137	0.74198932
	2.25	1167	1651	167	11	0.99066214	0.90814081	0.08252133	0.44526035
	2.5	587	2231	174	4	0.99323181	0.92765073	0.06558108	0.25400534
	2.75	240	2578	176	2	0.99173554	0.93609296	0.05564258	0.1388518
3.75	1.5	2551	197	137	111	0.95830203	0.58982036	0.36848167	0.89719626
	1.75	2328	420	193	55	0.97691985	0.68515498	0.29176487	0.84145527
	2	2051	697	218	30	0.98558385	0.76174863	0.22383522	0.75734312
	2.25	1160	1588	230	18	0.98471986	0.87348735	0.11123252	0.46395194
	2.5	584	2164	241	7	0.98815567	0.8997921	0.08836357	0.27536716
	2.75	238	2510	244	4	0.98347107	0.9114016	0.07206948	0.16088117
5.00	1.5	2497	146	188	165	0.93801653	0.43712575	0.50089078	0.89619493
	1.75	2291	352	261	92	0.9613932	0.57422512	0.38716808	0.8518024
	2	2028	615	300	53	0.97453148	0.67213115	0.30240033	0.77703605
	2.25	1150	1493	325	28	0.9762309	0.82123212	0.15499878	0.4923231
	2.5	579	2064	341	12	0.97969543	0.85821206	0.12148337	0.3070761
	2.75	235	2408	346	7	0.97107438	0.87436456	0.09670982	0.19392523

Tabla 9.8. Tabla de contingencias para valores de Q^* entre 6.25 y 8.75 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
6.25	1.5	2449	122	212	213	0.91998497	0.36526946	0.55471551	0.88818425
	1.75	2269	302	311	114	0.95216114	0.49265905	0.45950209	0.8611482
	2	2012	559	356	69	0.96684286	0.61092896	0.3559139	0.79038718
	2.25	1144	1427	391	34	0.97113752	0.78492849	0.18620903	0.5123498
	2.5	577	1994	411	14	0.97631134	0.82910603	0.14720531	0.32977303
	2.75	235	2336	418	7	0.97107438	0.84822077	0.12285361	0.21795728
7.50	1.5	2412	112	222	250	0.90608565	0.33532934	0.57075631	0.87917223
	1.75	2251	273	340	132	0.94460764	0.44535073	0.4992569	0.86481976
	2	1998	526	389	83	0.96011533	0.57486339	0.38525194	0.79672897
	2.25	1136	1388	430	42	0.96434635	0.76347635	0.20087	0.52269693
	2.5	573	1951	454	18	0.96954315	0.81122661	0.15831654	0.34279039
	2.75	234	2290	464	8	0.96694215	0.83151779	0.13542436	0.2329773
8.75	1.5	2373	107	227	289	0.89143501	0.32035928	0.57107573	0.86782377
	1.75	2231	249	364	152	0.93621486	0.40619902	0.53001583	0.86615487
	2	1987	493	422	94	0.95482941	0.53879781	0.41603159	0.8040721
	2.25	1133	1347	471	45	0.96179966	0.74092409	0.22087557	0.53538051
	2.5	570	1910	495	21	0.96446701	0.79417879	0.17028821	0.35547397
	2.75	234	2246	508	8	0.96694215	0.81554103	0.15140112	0.24766355

Tabla 9.9. Tablas de contingencia para valores de Q^*entre 10.00 y 35.00 [GJ].

Q^* [GJ]	$M_w{}^*$	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
10.00	1.5	2329	88	246	333	0.87490609	0.26347305	0.61143303	0.85947931
	1.75	2203	214	399	180	0.92446496	0.34910277	0.57536219	0.86849132
	2	1968	449	466	113	0.94569918	0.49071038	0.4549888	0.81241656
	2.25	1131	1286	532	47	0.96010187	0.70737074	0.25273113	0.55507343
	2.5	568	1849	556	23	0.96108291	0.76881497	0.19226794	0.37516689
	2.75	234	2183	571	8	0.96694215	0.79266521	0.17427693	0.26869159
22.50	1.5	1944	60	274	718	0.73027799	0.17964072	0.55063727	0.74032043
	1.75	1859	145	468	524	0.78010911	0.2365416	0.54356751	0.77670227
	2	1691	313	602	390	0.8125901	0.3420765	0.4705136	0.76535381
	2.25	1022	982	836	156	0.86757216	0.54015402	0.32741814	0.62016021
	2.5	529	1475	930	62	0.89509306	0.61330561	0.28178745	0.48698264
	2.75	219	1785	969	23	0.90495868	0.64814815	0.25681053	0.3965287
35.00	1.5	1632	45	289	1030	0.61307288	0.13473054	0.47834234	0.64118825
	1.75	1575	102	511	808	0.6609316	0.16639478	0.49453682	0.69626168
	2	1430	247	668	651	0.68716963	0.26994536	0.41722427	0.70026702
	2.25	884	793	1025	294	0.75042445	0.43619362	0.31423083	0.63718291
	2.5	487	1190	1215	104	0.82402707	0.49480249	0.32922458	0.56809079
	2.75	194	1483	1271	48	0.80165289	0.53848947	0.26316342	0.48898531

9.4 TABLAS DE CONTINGENCIA PARÁMETROS CON MEJOR PSS

Tabla 9.10. Tablas de contingencia de los parámetros que obtuvieron mejor Skill Score PSS (valores mayores a 0.6).

Q^*[J × 10^9]	$M_w{}^*$	T [Hr]	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	**PSS**	**ACC**
3.75	1.5	24	2379	80	254	283	0.8936	0.2395	**0.6541**	**0.8788**
5.00	1.5	24	2255	68	266	407	0.8471	0.2036	**0.6436**	**0.8415**
6.25	1.5	24	2166	59	275	496	0.8137	0.1766	**0.6370**	**0.8147**
6.25	1.75	24	2083	142	471	300	0.8741	0.2316	**0.6425**	**0.8525**
7.50	1.5	24	2104	54	280	558	0.7904	0.1617	**0.6287**	**0.7957**
7.50	1.75	24	2031	127	486	352	0.8523	0.2072	**0.6451**	**0.8401**
8.75	1.5	24	2046	52	282	616	0.7686	0.1557	**0.6129**	**0.7770**
8.75	1.75	24	1980	118	495	403	0.8309	0.1925	**0.6384**	**0.8261**
8.75	1.5	36	2235	76	258	427	0.8396	0.2275	**0.6120**	**0.8321**
8.75	1.75	36	2135	176	437	248	0.8959	0.2871	**0.6088**	**0.8585**
10	1.75	24	1924	111	502	459	0.8074	0.1811	**0.6263**	**0.8097**
10	1.75	36	2084	168	445	299	0.8745	0.2740	**0.6004**	**0.8441**
10	1.5	48	2329	88	246	333	0.8749	0.2635	**0.6114**	**0.8595**

9.5 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA *T* = 24 HORAS

Tabla 9.11. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de M_w^* con T = 24 horas.

Percentiles	M_w^*	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
5/85	1.5	2453	127	203	206	0.92252727	0.38484848	0.53767878	0.8885915
	1.75	2256	324	284	125	0.94750105	0.53289474	0.41460631	0.84978254
	2	1997	583	327	82	0.96055796	0.64065934	0.31989862	0.77751756
5/90	1.5	2335	108	222	324	0.87814968	0.32727273	0.55087695	0.85547006
	1.75	2172	271	337	209	0.91222176	0.44572368	0.46649807	0.83941117
	2	1938	505	405	141	0.93217893	0.55494505	0.37723388	0.78387421
5/95	1.5	2195	92	238	464	0.82549831	0.27878788	0.54671043	0.81398461
	1.75	2063	224	384	318	0.86644267	0.36842105	0.49802162	0.81866845
	2	1849	438	472	230	0.88936989	0.48131868	0.40805121	0.77651388
10/85	1.5	2453	130	200	206	0.92252727	0.39393939	0.52858787	0.88758782
	1.75	2256	327	281	125	0.94750105	0.53782895	0.4096721	0.84877886
	2	1997	586	324	82	0.96055796	0.64395604	0.31660192	0.77651388
10/90	1.5	2335	111	219	324	0.87814968	0.33636364	0.54178604	0.85446638
	1.75	2172	274	334	209	0.91222176	0.45065789	0.46156386	0.83840749
	2	1938	508	402	141	0.93217893	0.55824176	0.37393717	0.78287053
10/95	1.5	2195	95	235	464	0.82549831	0.28787879	0.53761952	0.81298093
	1.75	2063	227	381	318	0.86644267	0.37335526	0.49308741	0.81766477
	2	1849	441	469	230	0.88936989	0.48461538	0.4047545	0.7755102
15/85	1.5	2453	131	199	206	0.92252727	0.3969697	0.52555757	0.88725326
	1.75	2256	328	280	125	0.94750105	0.53947368	0.40802737	0.8484443
	2	1997	587	323	82	0.96055796	0.64505495	0.31550302	0.77617932
15/90	1.5	2335	112	218	324	0.87814968	0.33939394	0.53875574	0.85413182
	1.75	2172	275	333	209	0.91222176	0.45230263	0.45991912	0.83807293
	2	1938	509	401	141	0.93217893	0.55934066	0.37283827	0.78253597
15/95	1.5	2195	96	234	464	0.82549831	0.29090909	0.53458922	0.81264637
	1.75	2063	228	380	318	0.86644267	0.375	0.49144267	0.81733021
	2	1849	442	468	230	0.88936989	0.48571429	0.4036556	0.77517564

9.6 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA *T* = 36 HORAS

Tabla 9.12. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de M_w^* con T = 36 horas.

Percentiles	M_w^*	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
5/85	1.5	2550	180	150	108	0.95936795	0.54545455	0.4139134	0.90361446
	1.75	2321	409	198	60	0.9748005	0.6738056	0.3009949	0.84303882
	2	2039	691	218	40	0.98075998	0.76017602	0.22058396	0.75535475
5/90	1.5	2461	150	180	197	0.92588412	0.45454545	0.47133867	0.88386881
	1.75	2262	349	258	119	0.950021	0.57495881	0.37506219	0.84337349
	2	1991	620	289	88	0.95767196	0.68206821	0.27560375	0.76305221
5/95	1.5	2354	139	191	304	0.88562829	0.42121212	0.46441617	0.85174029
	1.75	2176	317	290	205	0.91390172	0.52224053	0.39166119	0.8253012
	2	1936	557	352	143	0.93121693	0.61276128	0.31845566	0.76572959
10/85	1.5	2550	183	147	108	0.95936795	0.55454545	0.40482249	0.90261044
	1.75	2321	412	195	60	0.9748005	0.67874794	0.29605256	0.84203481
	2	2039	694	215	40	0.98075998	0.76347635	0.21728363	0.75435074
10/90	1.5	2461	153	177	197	0.92588412	0.46363636	0.46224776	0.88286479
	1.75	2262	352	255	119	0.950021	0.57990115	0.37011985	0.84236948
	2	1991	623	286	88	0.95767196	0.68536854	0.27230342	0.76204819
10/95	1.5	2354	142	188	304	0.88562829	0.43030303	0.45532526	0.85073628
	1.75	2176	320	287	205	0.91390172	0.52718287	0.38671886	0.82429719
	2	1936	560	349	143	0.93121693	0.61606161	0.31515533	0.76472557
15/85	1.5	2550	183	147	108	0.95936795	0.55454545	0.40482249	0.90261044
	1.75	2321	412	195	60	0.9748005	0.67874794	0.29605256	0.84203481
	2	2039	694	215	40	0.98075998	0.76347635	0.21728363	0.75435074
15/90	1.5	2461	153	177	197	0.92588412	0.46363636	0.46224776	0.88286479
	1.75	2262	352	255	119	0.950021	0.57990115	0.37011985	0.84236948
	2	1991	623	286	88	0.95767196	0.68536854	0.27230342	0.76204819
15/95	1.5	2354	142	188	304	0.88562829	0.43030303	0.45532526	0.85073628
	1.75	2176	320	287	205	0.91390172	0.52718287	0.38671886	0.82429719
	2	1936	560	349	143	0.93121693	0.61606161	0.31515533	0.76472557

9.7 TABLAS DE CONTINGENCIA BANDAS DE ALERTA *T* = 48 HORAS

Tabla 9.13. Tablas de contingencia generadas con las distintas combinaciones de percentiles y valores de M_w^* con T = 48 horas.

Percentiles	M_w^*	TP	FP	TN	FN	TPR	FPR	PSS	ACC
5/85	1.5	2591	233	97	67	0.97479308	0.70606061	0.26873247	0.89959839
	1.75	2347	477	130	34	0.98572029	0.78583196	0.19988833	0.8289826
	2	2062	762	147	17	0.99182299	0.83828383	0.15353916	0.7392905
5/90	1.5	2542	184	146	116	0.95635816	0.55757576	0.39878241	0.89959839
	1.75	2319	407	200	62	0.97396052	0.67051071	0.30344981	0.84303882
	2	2035	691	218	44	0.97883598	0.76017602	0.21865996	0.75401606
5/95	1.5	2485	158	172	173	0.93491347	0.47878788	0.45612559	0.88922356
	1.75	2278	365	242	103	0.95674087	0.60131796	0.35542291	0.84337349
	2	2000	643	266	79	0.96200096	0.70737074	0.25463022	0.7583668
10/85	1.5	2591	235	95	67	0.97479308	0.71212121	0.26267187	0.89892905
	1.75	2347	479	128	34	0.98572029	0.78912685	0.19659343	0.82831325
	2	2062	764	145	17	0.99182299	0.84048405	0.15133894	0.73862115
10/90	1.5	2542	186	144	116	0.95635816	0.56363636	0.3927218	0.89892905
	1.75	2319	409	198	62	0.97396052	0.6738056	0.30015492	0.84236948
	2	2035	693	216	44	0.97883598	0.76237624	0.21645974	0.75334672
10/95	1.5	2485	160	170	173	0.93491347	0.48484848	0.45006498	0.88855422
	1.75	2278	367	240	103	0.95674087	0.60461285	0.35212802	0.84270415
	2	2000	645	264	79	0.96200096	0.70957096	0.25243	0.75769746
15/85	1.5	2591	235	95	67	0.97479308	0.71212121	0.26267187	0.89892905
	1.75	2347	479	128	34	0.98572029	0.78912685	0.19659343	0.82831325
	2	2062	764	145	17	0.99182299	0.84048405	0.15133894	0.73862115
15/90	1.5	2542	186	144	116	0.95635816	0.56363636	0.3927218	0.89892905
	1.75	2319	409	198	62	0.97396052	0.6738056	0.30015492	0.84236948
	2	2035	693	216	44	0.97883598	0.76237624	0.21645974	0.75334672
15/95	1.5	2485	160	170	173	0.93491347	0.48484848	0.45006498	0.88855422
	1.75	2278	367	240	103	0.95674087	0.60461285	0.35212802	0.84270415
	2	2000	645	264	79	0.96200096	0.70957096	0.25243	0.75769746

9.8 TABLA DE PORCENTAJE DE TN EN LA CANTIDAD DE ACIERTOS (TN+TP)

Tabla 9.14. Porcentaje de TN en la cantidad de aciertos para T =24, 36 y 48 horas.

Q^*[GJ]	$M_w{}^*$	%TN T=24 horas	%TN T=36 horas	%TN T=48 horas
2.50	1.5	8.033%	4.974%	4.034%
	1.75	11.332%	7.146%	5.812%
	2	13.632%	8.872%	7.197%
3.75	1.5	9.647%	7.001%	5.097%
	1.75	14.086%	10.338%	7.656%
	2	17.481%	12.921%	9.608%
5.00	1.5	10.551%	8.156%	7.002%
	1.75	16.549%	12.112%	10.227%
	2	20.837%	15.233%	12.887%
6.25	1.5	11.266%	9.000%	7.967%
	1.75	18.442%	14.069%	12.054%
	2	23.460%	17.659%	15.034%

7.50	1.5	11.745%	9.646%	8.428%
	1.75	19.309%	15.531%	13.122%
	2	24.869%	19.736%	16.297%
8.75	1.5	12.113%	10.349%	8.731%
	1.75	20.000%	16.991%	14.027%
	2	25.887%	21.672%	17.518%
10.00	1.5	12.450%	10.664%	9.553%
	1.75	20.692%	17.596%	15.334%
	2	26.879%	22.770%	19.145%
22.50	1.5	16.676%	13.865%	12.353%
	1.75	26.923%	22.750%	20.112%
	2	34.977%	29.658%	26.254%
35.00	1.5	24.941%	17.175%	15.044%
	1.75	38.177%	27.691%	24.497%
	2	48.409%	35.795%	31.840%