



Plan Operacional de Tronaduras - Plan de Descontaminación de Calama

Codelco DN - Dirección de Sustentabilidad Estratégica

Diciembre 2022



Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. RESPONSABILIDADES	5
3. CARACTERÍSTICAS DE LAS TRONADURAS.....	7
4. PLAN OPERACIONAL DE TRONADURAS	20
5. REPORTES.....	28
6. ANEXO “FUNDAMENTO TÉCNICO PROTOCÓLO OPERACIONAL DE TRONADURAS”	32



1. INTRODUCCIÓN

El Plan de Descontaminación Atmosférico de Calama (PDAC), en su artículo n° 23, señala que “Los titulares de faenas mineras, deberán implementar medidas para reducir la dispersión de polvo hacia la ciudad de Calama provenientes de tronaduras. Para ello deberán considerar las condiciones meteorológicas, tales como la dirección y velocidad del viento, entre otras” y que dichos titulares deben presentar un “Plan Operacional que contenga las acciones para dar cumplimiento a la referida exigencia”.

CODELCO entregó con fecha de 11 de agosto de 2022 una primera versión de un Plan Operacional para Tronaduras al que el Ministerio de Medio Ambiente hizo observaciones. Con el objetivo de subsanar estas observaciones, se acordó presentar un nuevo Plan Operacional y responder a cada una de las observaciones en un documento aparte. En el presente documento, se desarrolla el nuevo Plan Operacional de Tronaduras y en el “Anexo”, se detallan los criterios técnicos considerados para la determinación de las variables meteorológicas claves que definen el presente Plan.

A continuación, el Plan Operacional de Tronaduras para las 3 Divisiones de Codelco afectas al Plan de Descontaminación de Calama.

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es establecer los criterios operacionales para la ejecución de las actividades de Tronaduras en las Divisiones de Codelco Distrito Norte afectas al PDAC, de acuerdo con lo indicado en el artículo n°23 del Plan, exigencia que busca reducir la dispersión de material particulado hacia la “ciudad de Calama” proveniente de las tronaduras.



1.2 UBICACIÓN DIVISIONES DE CODELCO

Las tres Divisiones de Codelco, a las cuales les aplican las exigencias establecidas en el Plan de Descontaminación de Calama son, Ministro Hales, Chuquicamata y Radomiro Tomic. Estas operaciones mineras, se encuentran respectivamente a una distancia en línea recta de 5, 17 y 22 kilómetros respectivamente de la ciudad de Calama.



Figura 1. Ubicación Divisiones de Codelco y Ciudad de Calama

1.3 ALCANCE DEL PLAN OPERACIONAL DE TRONADURAS

El alcance de este procedimiento incluye todas las actividades de tronadura que se realicen como parte de la operación de las Divisiones Ministro Hales, Chuquicamata y Radomiro Tomic.

1.4 ABREVIACIONES

PDAC: Plan de Descontaminación Atmosférica de Calama

POT: Plan Operacional de Tronaduras

D.N: Distrito Norte de Codelco

DMH: División Ministro Hales

DCH: División Chuquicamata

DRT: División Radomiro Tomic



MP: Material Particulado

MP₁₀: Material Particulado con diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrones.

FE: Factor de emisión, que corresponde a un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante.

2. RESPONSABILIDADES

2.1 SUPERINTEDENTE DE PERFORACIÓN/OPERACIONES MINA

Es el/la responsable de gestionar la planificación y ejecución de las tronaduras, de tal forma de entregar a los diferentes clientes un producto que satisfaga sus necesidades. Para ello, tiene la responsabilidad de realizar gestión para controlar y liderar de forma segura y eficiente el Proceso de Tronadura, considerando la asistencia técnica, soporte, oportunidades y/o mejoramiento continuo del proceso y todo lo concerniente a explosivos.

Debe gestionar la revisión y actualización del presente procedimiento de tronadura cada vez que se generen modificaciones al proceso o al menos anual.

2.2 INGENIERO/A A CARGO DE LA TRONADURA (O SIMIL)

Es responsable de ejecutar todas las actividades del Proceso de Tronadura, incluida la verificación de las condiciones meteorológicas según el POT descrito en el presente documento. Debe mantener vigente su Licencia de Programador Calculista, para trabajar con explosivos, emitida por autoridad fiscalizadora.

2.3 INGENIERO/A A EXPERTO TRONADURA (O SIMIL)

Es responsable de administrar el contrato de la empresa de Servicio de Tronadura y debe controlar que ésta cumpla todos los lineamientos definidos en los procedimientos operativos asociados a la tronadura y a los relativos al presente documento.



Debe mantener vigente su Licencia de Programador Calculista para trabajar con explosivos, emitida por autoridad fiscalizadora.

2.4 INGENIERO/A EXPERTO OPERACIONES MINA (O SIMIL)

Es responsable de participar en todas las coordinaciones del Proceso de Tronadura y asegurar que los miembros de la Superintendencia de Operaciones Mina cumplan los roles respectivos para dar cumplimiento al Proceso de Tronadura, de acuerdo con lo establecido en los procedimientos operativos vigentes y de acuerdo con lo establecido por el presente documento.

2.5 INGENIERO/A PRODUCCIÓN – DESPACHO (O SIMIL)

Es responsable de la entrega de frecuencia radial para el Proceso de Tronadura, de monitorear el despeje de equipos en sistema Mineops de acuerdo con el halo de despeje y de informar del Proceso de Tronadura por vía radial a cualquier empresa de ingreso esporádico al área mina. Todas estas actividades debe realizarlas de acuerdo con lo establecido en los procedimientos operacionales vigentes y en función a lo establecido en el presente documento.

2.6 DIRECTOR MEDIO AMBIENTE Y TERRITORIO DIVISIONAL

Responsable de controlar, verificar y administrar el cumplimiento de la ejecución del POT y además, es el nexo entre las Gerencias Operativas y la Gerencia de Sustentabilidad Distrital.

2.7 DIRECTOR DE COMUNICACIONES DISTRITAL

Responsable de establecer las comunicaciones dentro y fuera de las Divisiones. Tiene a cargo el relacionamiento con autoridades y stakeholders insertos en el territorio. En el contexto de ejecución del POT, en caso de alguna contingencia, es el encargado de establecer las comunicaciones y entregar la información que sea requerida.



3. CARACTERÍSTICAS DE LAS TRONADURAS

3.1 DEFINICIÓN

Tronadura se define como la operación unitaria que se ejecuta en minería con el objeto de fragmentar el macizo rocoso, logrando reducir el tamaño del material a un diámetro menor a 1 metro (esto varía en cada operación minera), tamaño ideal para luego procesar el mineral en las plantas de conminución (Chancadores). El proceso en lo particular consiste en depositar explosivos en pozos de perforación construidos en el macizo rocoso para luego, establecer una secuencia de detonaciones, llevando a cabo una fragmentación de la roca por etapas y de esta forma lograr el tamaño de roca requerido.



Figura 2. Pozos de perforación donde van los explosivos, etapa previa a la ejecución de una Tronadura.



Figura 3. Ejemplo de Ejecución de Tronadura en DRT.

Las tronaduras se ejecutan en sectores denominados “bancos” que corresponden a cortes escalonados en los Rajos Abiertos. En estos cortes se ven dos caras, una superior horizontal y una vertical. Es en estos bancos, en su parte horizontal, donde se perforan los pozos para luego, incorporar los explosivos que darán vida a la tronadura. Para mayor explicación a continuación, imágenes de los tres Rajos de Codelco DN afectados al PDAC y ejemplos de bancos constituidos y operativos:



Figura 4. Rajo División Radomiro Tomic.

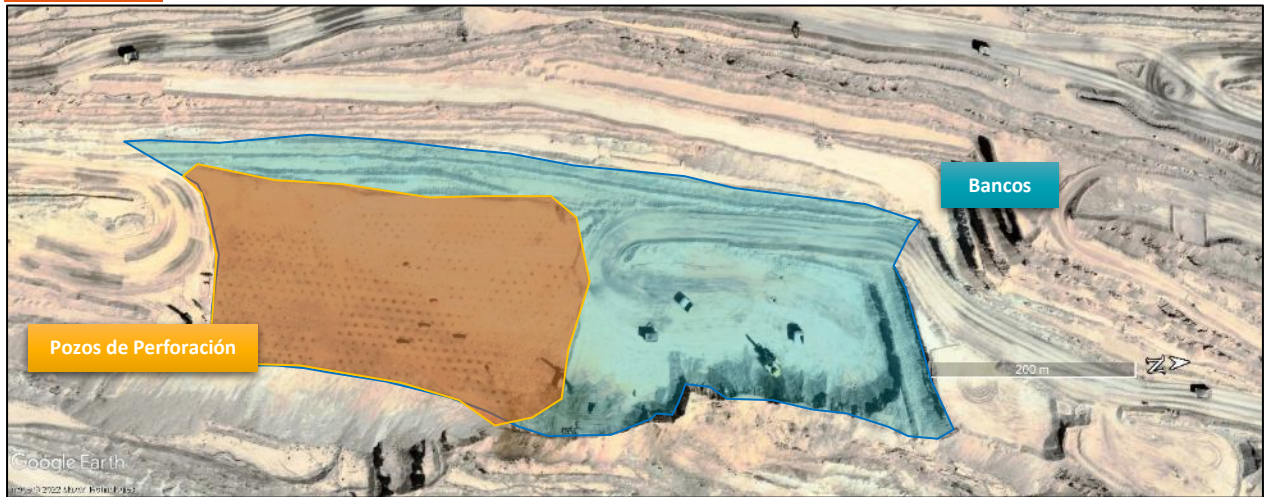


Figura 5. Rajo División Radomiro Tomic, zoom a Banco y Pozos perforados.

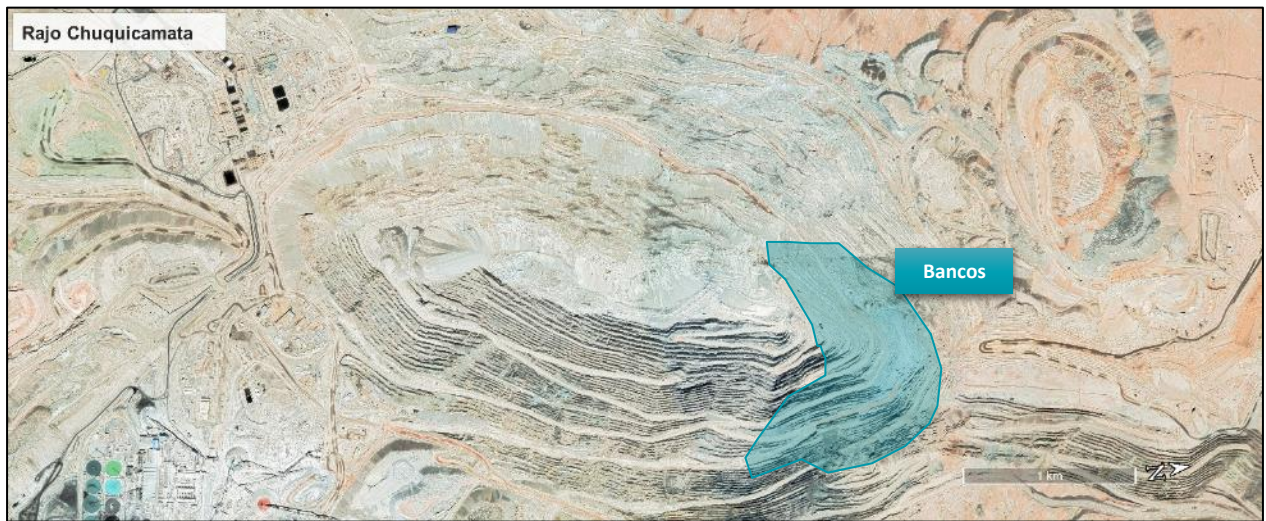


Figura 6. Rajo División Chuquicamata.



Figura 7. Rajo División Chuquicamata, zoom a Banco y Pozos perforados.

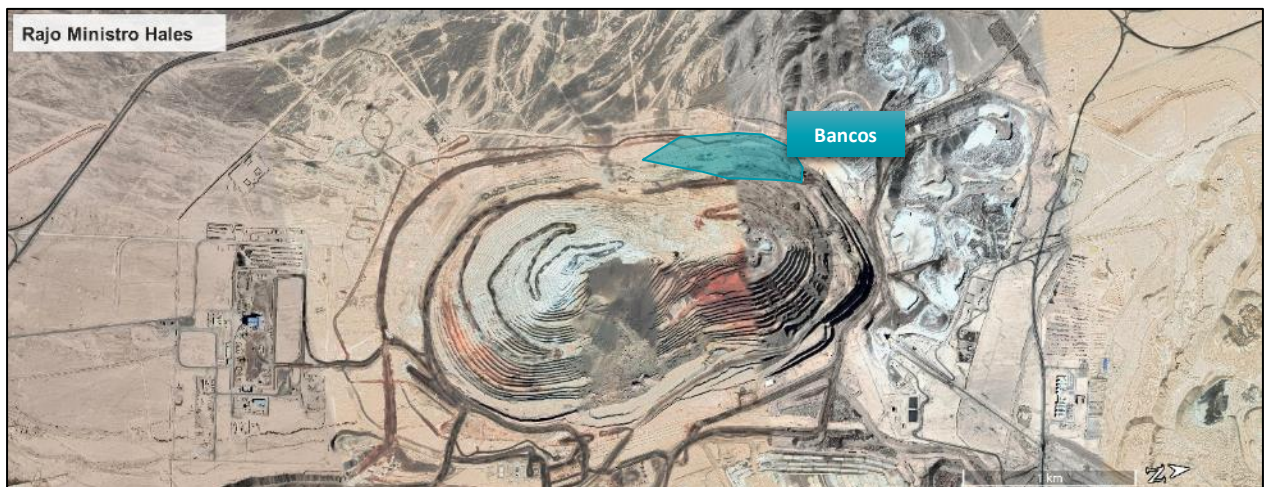


Figura 8. Rajo División Ministro Hales.



Figura 9. Rajo División Ministro Hales, zoom a Banco y Pozos perforados.



3.2 OPERACIÓN TRONADURAS EN CODELCO DISTRITO NORTE

Las tronaduras en Codelco Distrito Norte (DN) varían entre cada División, esto debido a que los yacimientos poseen sus propias características mineralógicas, por ende, cada uno necesita un tratamiento ad-hoc.

Las Divisiones Ministro Hales (DMH), Chuquicamata (DCH) y Radomiro Tomic (DRT) son las faenas del DN que efectúan tronaduras en la zona que contempla el PDAC. El número de tronaduras por semana depende de la división; en DMH y DRT, es muy frecuente que se efectúan tronaduras todos los días. Para el caso de DCH se realizan de tres a cuatro tronaduras en forma semanal.

Cabe destacar que, en ningún caso, se trata de más de una tronadura al día por División.

Por otra parte, tampoco se ejecutarán tronaduras al mismo tiempo o en forma simultánea entre Divisiones.

El horario en que se realizan las tronaduras varía entre las Divisiones, en un horario preestablecido que varía entre las 12:00 hasta las 18:00 horas como límite. En específico, a continuación, las características por División:

3.2.1 TRONADURAS EN DMH

Para el caso específico de DMH, las tronaduras tienen las siguientes características generales:

- Tronaduras a un solo banco.
- La cantidad de material removido por tronadura en promedio varía entre 80.000 toneladas y 400.000 toneladas de material.
- Se ejecutan alrededor de 100 pozos de perforación (donde van los explosivos) por tronadura.
- La planificación de la tronadura se realiza en reunión de turno todos los días a las 08:00 horas.
- Las tronaduras se ejecutan de lunes a domingo solo con luz de día entre las 14:00 horas y 18:00 horas.



- El Ingeniero de Tronadura, es el profesional a cargo de iniciar la tronadura una vez haya verificado que todas las condiciones ambientales (meteorológicas establecidas en el presente POT) y de seguridad (como el despeje de áreas) se hayan cumplido cabalmente.

3.2.2 TRONADURAS EN DCH

Para el caso específico de DCH, las tronaduras tienen las siguientes características generales:

- Tronaduras a un solo banco.
- Cantidad de material promedio removido por tronadura es de 433.000 toneladas.
- Se ejecutan alrededor de 245 pozos de perforación por tronadura.
- Las tronaduras se ejecutan entre lunes y viernes (en promedio dos, máximo tres días a la semana) entre las 12:00 y 15:00 horas.
- El Ingeniero de Tronadura o similar, es el profesional a cargo de iniciar la tronadura una vez haya verificado que todas las condiciones ambientales (meteorológicas establecidas en el presente POT) y de seguridad (como el despeje de áreas) se hayan cumplido cabalmente.

3.2.3 TRONADURAS EN DRT

Para el caso específico de DRT, las tronaduras tienen las siguientes características generales:

- Tronaduras a un solo banco.
- Cantidad de material promedio removido por tronadura es de 900.000 toneladas.
- Se ejecutan alrededor de 272 pozos de perforación por tronadura.
- Las tronaduras se ejecutan en promedio 4 días a la semana entre las 13:00 y 16:30 horas.
- El Ingeniero de Tronadura, es el profesional a cargo de iniciar la tronadura una vez haya verificado que todas las condiciones ambientales (meteorológicas establecidas en el presente POT) y de seguridad (como el despeje de áreas) se hayan cumplido cabalmente.

Cabe destacar que si bien cada División tiene pre establecido su horario de tronaduras, en caso de alguna División requiera ejecutar una tronadura dentro del horario comprendido entre 12:00 y 18:00 horas pero fuera del pre establecido, deberá notificar a través del portal WEB el cambio.



3.3 CUANTIFICACIÓN DE MP EN TRONADURAS

Con respecto a la cuantificación del Material Particulado correspondiente a 10 micrones (MP_{10}), contaminante que regula el PDAC, no existe ninguna manera directa de medir las emisiones de MP_{10} de una tronadura. Es práctica común para este tipo de emisiones, estimar su magnitud a través de “factores de emisión”. De hecho, las estimaciones de emisiones del PDAC se basan en el uso de factores de emisión. En el caso de una tronadura, y usando el mismo factor de emisión utilizado en la formulación del PDAC, la magnitud de la emisión de MP_{10} sólo depende del área en que se realiza una tronadura. Las áreas tronadas llegan hasta aproximadamente 10.000 m², lo que resultaría a una emisión de aproximadamente 100 kg de MP_{10} por tronadura, lo que daría en el peor de los casos, tronando los 365 días del año, una emisión de MP_{10} de 36,5 toneladas de este contaminante en un año calendario.

A continuación, se detalla el factor de emisión de MP_{10} para la actividad de Tronadura:

Factor de emisión de MP_{10} para Tronadura:

$$FEMP_{10} = k * 0,00022 * (A)^{1,5}$$

Donde:

- FE: Factor de emisión (kg/perforación).
- k: Factor tamaño partícula MP_{10} = 0,52
- A: Área de la tronadura (m²)

Mientras la magnitud de las emisiones de las tronaduras, dentro de un contexto minero, no son muy significativas, se pueden probablemente considerar las más llamativas. Debido a que la emisión es en un instante de tiempo, su impacto visual, en ese instante, puede ser mayor que el de una emisión de mayor magnitud, debido a que lo visible, corresponde principalmente a material particulado con un tamaño mayor a 30 micrones.

En las Figura 10 y 11, se entregan dos ejemplos del impacto visual desde Calama de tronaduras correspondientes a DMH y DCH. Con respecto a tronaduras de DRT, éstas son poco visibles desde la ciudad de Calama dada la distancia de 25 kilómetros que hay entre el Rajo y la Ciudad.



Figura 10. Ejecución de Tronadura en DMH vista desde Calama.



Figura 11. Ejemplo Ejecución de Tronadura en DCH vista desde Calama.



El objetivo del artículo N° 23 del PDAC es que las emisiones no causen un impacto en la calidad del aire en Calama. Es decir, evitar que material particulado de las emisiones asociadas a las tronaduras y tales como se pueden ver en las Figuras 10 y 11 se dirijan a hacia la ciudad de Calama.

3.4 DISPERSIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO DE LAS TRONADURAS

Tal como se menciona en el presente documento, no es posible determinar directamente el comportamiento que tendrá la emisión de Material Particulado producto de la ejecución de una Tronadura, sin embargo, existen modelos de dispersión de contaminantes como CALPUFF donde se puede simular el comportamiento que tendría la emisión del Material Particulado producto de una tronadura. Bajo este contexto, Codelco posee herramientas para poder predecir condiciones meteorológicas favorables y/o adversas para la ejecución de las tronaduras. Estas se detallan a continuación:

3.4.1 PRONÓSTICO METEOROLÓGICO

Existe un reporte meteorológico por División que llega diariamente a las 08:00 horas, el cual para el caso específico de DMH, contiene una indicación de las condiciones favorables o desfavorables para poder ejecutar las tronaduras. Esta información es utilizada por el área operativa a cargo de las tronaduras para su planificación. A continuación, un ejemplo de este reporte meteorológico:



Fecha	Condición Meteorológica	Probabilidad de Precipitación	Temperatura		Humedad		Viento Máximo Horario	Rachas	Hora Máximo Viento	TRONADURAS					*	☾	Índice UV		
			Min.	Max.	Min.	Max.				12H	13H	14H	15H	16H				17H	18H
Jueves 3 de Noviembre		S/P	7°C	26°C	2%	22%	35 km/hr	49 km/hr	15:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:49	19:49	11 MUY ALTO
Viernes 4 de Noviembre		S/P	6°C	26°C	4%	20%	33 km/hr	47 km/hr	16:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:49	19:49	11 MUY ALTO
Sábado 5 de Noviembre		S/P	7°C	25°C	3%	19%	33 km/hr	47 km/hr	16:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:48	19:50	11 MUY ALTO
Domingo 6 de Noviembre		S/P	8°C	26°C	2%	17%	37 km/hr	51 km/hr	16:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:48	19:50	11 MUY ALTO
Lunes 7 de Noviembre		S/P	7°C	25°C	4%	20%	34 km/hr	48 km/hr	16:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:47	19:51	11 MUY ALTO
Martes 8 de Noviembre		S/P	7°C	24°C	7%	25%	34 km/hr	48 km/hr	17:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:47	19:52	11 MUY ALTO
Miércoles 9 de Noviembre		S/P	7°C	24°C	5%	28%	34 km/hr	47 km/hr	17:00	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	06:46	19:52	11 MUY ALTO

El símbolo X significa que hay una probabilidad importante de viento hacia Calama en el horario indicado. Se debe asegurar una dirección de viento favorable con los datos de la estación DMH-Sur antes de realizar tronaduras

Figura 12. Reporte meteorológico para División Ministro Hales con indicación para Tronaduras.

Para las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic, se generan reportes meteorológicos similares al de División Ministro Hales, sin embargo no contienen las indicaciones con respecto a las condiciones meteorológicas favorables y/o desfavorables para ejecutar las tronaduras, por lo que, motivo de este Plan Operacional de Tronaduras, será incorporado a los pronósticos meteorológicos la indicación de condiciones favorables / desfavorables para ejecutar tronaduras para ambas Divisiones.



Sector Mina		Fecha	Condición Meteorológica	Probabilidad de Precipitaciones	T-Min.	T-Max.	Viento máximo horario	Rachas	Hora viento máximo	UV
		Jueves 3 de Noviembre		S/P	11 °C	23 °C	24.8 km/h	50.7 km/h	15:00	11 EXTREMO
		Viernes 4 de Noviembre		S/P	10 °C	22 °C	25.3 km/h	52.9 km/h	16:00	11 EXTREMO
		Sábado 5 de Noviembre		S/P	10 °C	21 °C	25.8 km/h	50.0 km/h	16:00	11 EXTREMO
		Domingo 6 de Noviembre		S/P	11 °C	22 °C	26.1 km/h	51.1 km/h	16:00	11 EXTREMO
		Lunes 7 de Noviembre		S/P	11 °C	22 °C	27.0 km/h	54.8 km/h	16:00	11 EXTREMO
		Martes 8 de Noviembre		S/P	10 °C	21 °C	31.2 km/h	66.2 km/h	19:00	11 EXTREMO
		Miércoles 9 de Noviembre		S/P	9 °C	19 °C	45.9 km/h	82.7 km/h	17:00	11 EXTREMO

Figura 13. Reporte meteorológico para División Chuquicamata.


Osmosis														
Pronóstico Hoy				Proyección Semanal										
Hora	T (°C)	V (km/h)	Rachas (km/h)	Fecha	Cond	Precip	UV	Mañana (00:00 - 12:00)			Tarde (13:00 - 23:00)			
								T _{min} (°C)	Viento (km/h)	Rachas (km/h)	T _{max} (°C)	Viento (km/h)	Rachas (km/h)	
00:00	11.1	4	5	Jueves 3 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	7	26	34	20	30	40	
01:00	10.8	5	6	Viernes 4 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	7	22	29	19	35	46	
02:00	9.9	4	6	Sábado 5 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	7	22	28	19	37	48	
03:00	9.1	4	5	Domingo 6 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	6	14	18	20	36	47	
04:00	7.9	6	7	Lunes 7 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	6	24	32	18	41	53	
05:00	7.5	6	7	Martes 8 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	5	29	38	17	47	61	
06:00	7.1	5	6	Miércoles 9 de Noviembre		S/P	11 EXTREMO	5	50	65	16	57	74	
07:00	10.3	3	5	Ubicación Estación Osmosis										
08:00	14.5	3	5											
09:00	17.3	6	8											
10:00	18.2	10	13											
11:00	19.3	18	23											
12:00	19.1	26	34											
13:00	18.9	30	39											
14:00	19.5	30	39											
15:00	19.5	30	38											
16:00	17.9	30	40											
17:00	17.8	30	39											
18:00	16.9	25	32											
19:00	14.6	20	26											
20:00	11.6	19	24											
21:00	10.6	14	18											
22:00	9.9	9	11											
23:00	9.5	4	5											

Figura 14. Reporte meteorológico para División Radomiro Tomic.

2.4.2 MODELO DE DISPERSIÓN DE TRONADURAS

Adicionalmente, Codelco DN cuenta con la posibilidad de simular la dispersión de contaminantes motivo de una Tronadura para la División DMH. Esta herramienta también será reproducida para las Divisiones Chuquicamata y Radomiro Tomic motivo del presente Plan, la cual estará disponible en caso de ser solicitada por la autoridad fiscalizadora.



Esta herramienta muestra gráficamente el comportamiento que tendría la dispersión de una tronadura en horarios predefinidos. A continuación, se muestra gráficamente como se despliega esta información:



Figura 15. Visor de dispersión MP₁₀ para tronaduras de DMH.

En el ejemplo indicado en la Figura 15, se simula la dispersión de MP₁₀ que tendría una tronadura que emita 100 kilos de MP₁₀ a las 14:00 horas del viernes 04 de noviembre 2022. La gama de colores representados por la columna “Leyenda” entregan la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de MP₁₀ y la dispersión que tendría la pluma post tronadura. Ahora bien, porque se ha definido solo ejecutar tronaduras durante la tarde entre 12:00 horas y 18:00 horas, debido a que los modelos de dispersión indican que, en un horario distinto, la pluma de dispersión podría comportarse con dirección hacia la ciudad de Calama:



Figura 16. Visor de dispersión MP₁₀ para tronaduras de DMH en horario matinal a las 08:00 horas.

4. PLAN OPERACIONAL DE TRONADURAS

4.1 PROTOCOLO OPERACIONAL DE TRONADURAS

Motivo del presente Plan Operacional, se ha definido un protocolo de ejecución de tronaduras el cual, define el “momento de una tronadura” como la condición favorable para poder ejecutar una tronadura. Este protocolo está condicionado a un “ángulo crítico” para las Divisiones DMH, DCH y DRT. El “momento de una tronadura” se define como la condición meteorológica favorable correspondiente a una dirección de viento fuera del “ángulo crítico” **definido entre los 30,3° y 329,7°** y, además, cuando su **velocidad es superior a los 2 m/s.**

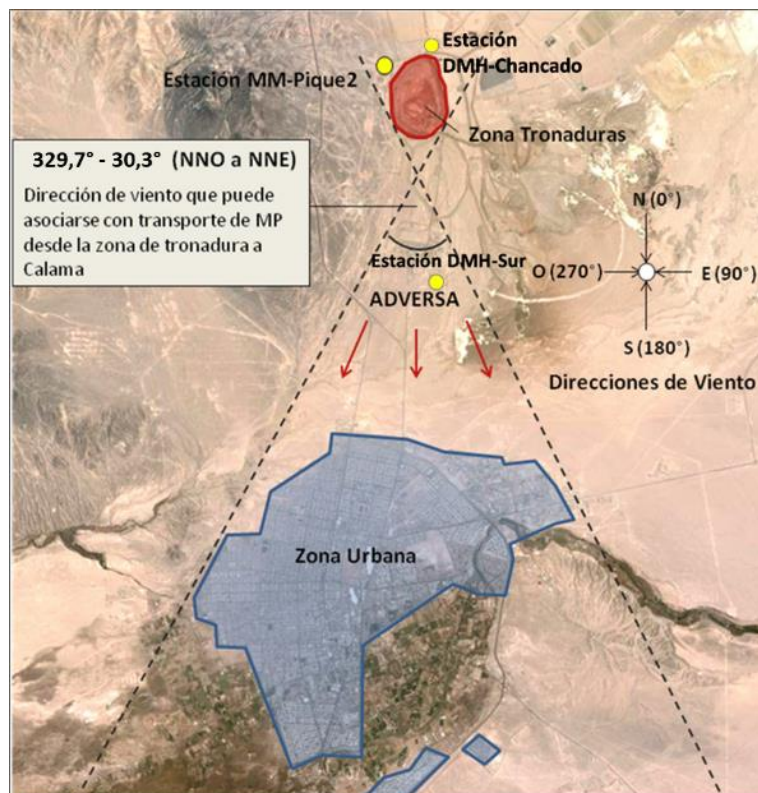


Figura 17. Ángulo Crítico definido por el Plan Operacional de Tronaduras

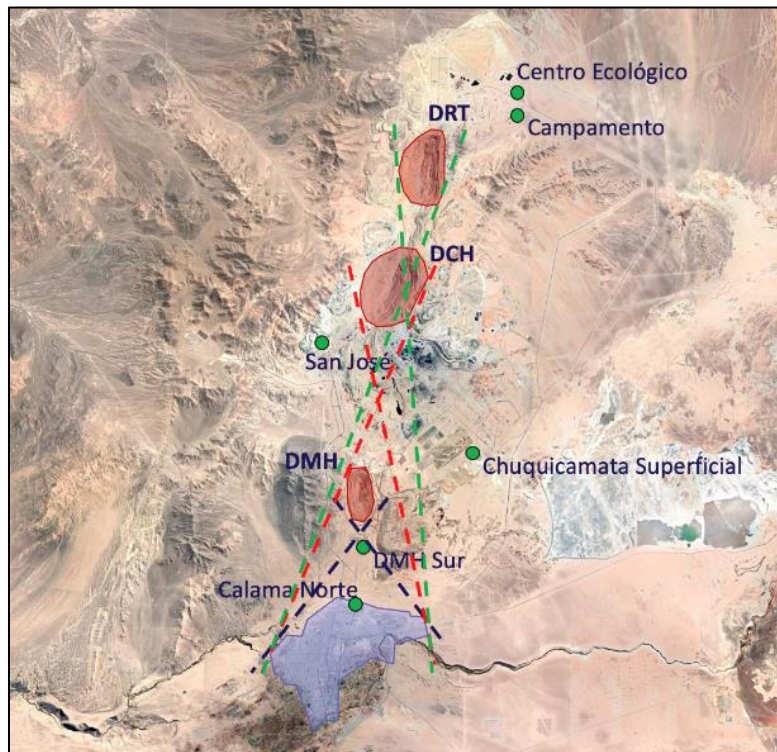


Figura 18. Ángulos críticos geométricos para cada división.

Tal como se indica, la definición del “momento de tronadura” es la evaluación de la posibilidad de si se puede tronar o no en función a las condiciones meteorológicas de dirección y velocidad del viento, con datos del momento (minutal). No obstante, es importante considerar que usar un solo dato no necesariamente representa un criterio robusto; o sea, por lo que se define una ventana temporal anterior al momento mismo que la situación con respecto a la dirección y velocidad del viento es “regular”.

En esta evaluación se determinó, qué significaría una situación “regular” en una ventana temporal que va desde 1 hasta 30 minutos antes del “momento de una tronadura”, y luego otra ventana para los siguientes 10 minutos. Se define, en este caso, una situación “regular”, *en que todos los valores, con excepción de uno, deben estar fuera del ángulo crítico (considerando la característica turbulenta de la atmósfera durante el día, se estima que puede haber un valor dentro del ángulo crítico sin que se considere una situación desfavorable).*



Para este análisis, definido como “momento de tronadura” se evaluaron todos los minutos dentro de las 12:00 – 18:00 horas y con todos los datos desde 1 de enero del 2017 hasta 31 de octubre del 2022 de la estación DMH Sur para la definición del criterio.

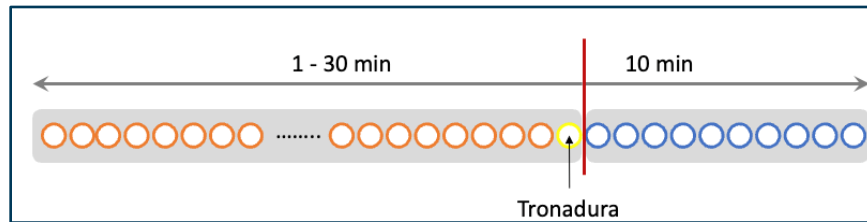


Figura 19. Esquema de las ventanas evaluadas antes y después del momento de la tronadura.

En la Figura 20, se muestra el resultado de esta evaluación para la estación de referencia DMH Sur. En el eje x, se muestra el ancho temporal de la ventana y en el eje y la probabilidad de que se presente una situación favorable en la ventana anterior del momento de la tronadura y una situación desfavorable en la ventana 10 minutos después de la tronadura.

Se puede ver que una ventana mayor con una situación favorable disminuye la probabilidad de que se presente una situación desfavorable en los siguientes 10 minutos (o aumenta la probabilidad de que los siguientes 10 minutos sean favorables). **Los cambios mayores en la probabilidad se observan entre los minutos 1 y 15; las mejoras con ventanas mayores de 15 minutos sólo son marginales (la diferencia entre 15 y 30 minutos es sólo aproximadamente un 0,25%).** En este contexto, es por esto por lo que se definió **una ventana de 15 minutos**, lo que asegura que la probabilidad de una situación favorable después de una tronadura es igual o mayor a un 99%.

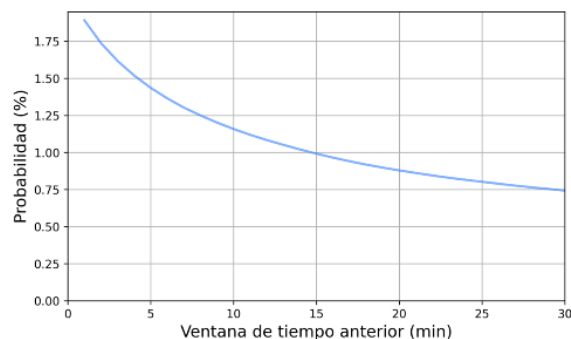


Figura 20. Probabilidad de que se presente una situación favorable en la ventana anterior del momento de la tronadura y una situación desfavorable en la ventana 10 minutos después de la tronadura.



Mencionado lo anterior, el protocolo para definir la ejecución de la tronadura se resume en el siguiente esquema:

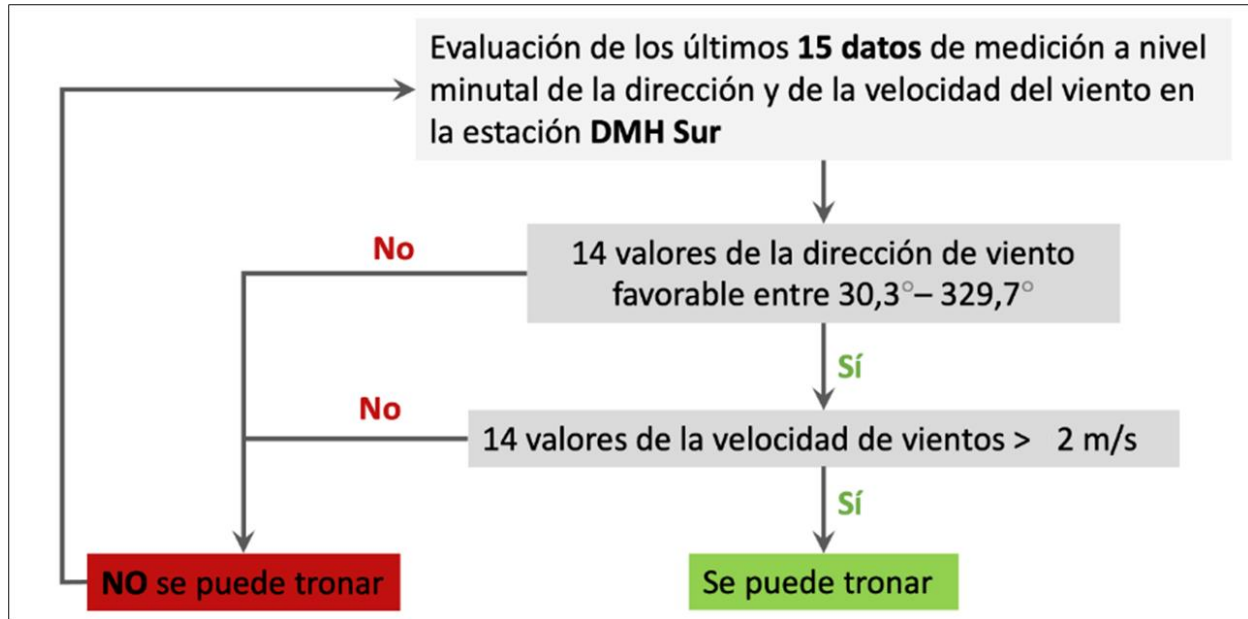


Figura 21. Protocolo para la ejecución de las Tronaduras

Este protocolo establece una evaluación minotal de la dirección y velocidad del viento 15 minutos antes de la ejecución de una tronadura, donde, en caso de existir más de un valor por fuera de lo definido como “momento de una tronadura” se deberá repetir el procedimiento indicado en la Figura 21.

No obstante lo anterior, en caso de que la evaluación de la condición para ejecutar la tronadura, la cual es minuto a minuto, de como resultado que el valor número 15, no cumpla con alguna de las dos condiciones meteorológicas predefinidas, esto quiere decir, ángulo de dirección y velocidad del viento, se procederá a evaluar por 5 minutos adicionales la condición meteorológica del viento para poder determinar el “momento de tronadura”.

En resumen, las condiciones para la ejecución de la tronadura definida como “momento de tronadura” son las siguientes:

- ❖ Estación meteorológica para la evaluación del momento de tronadura para las 3 Divisiones: Estación DMH Sur.



- ❖ Angulo Crítico donde no se puede tronar: **entre 30,3° y 329,7°**.
- ❖ Velocidad de viento: **mayor a 2 m/s**.
- ❖ Valores minutales necesarios para el momento de tronadura: 14 valores como mínimo. Excepcionalmente, en caso de que el valor numero 15 este fuera de los criterios predefinidos, se procederá a evaluar por 5 minutos adicionales el comportamiento del viento para el momento de tronadura.

4.2 CONDICIONES METEOROLOGICAS ADVERSAS PARA LA EJECUCIÓN DE LAS TRONADURAS

De acuerdo a como se indica en el punto 3.4.1, Codelco cuenta con pronósticos meteorológicos diarios por cada División afectas al PDAC, en este caso, el presente POT considera que en caso de que se pronostique algún evento meteorológico que pueda afectar la dispersión del material particulado, se evaluara de forma horaria las condiciones meteorológicas locales para determinar la factibilidad de ejecución de la/las tronaduras. En caso de que la condición adversa se mantenga, se procederá a la reprogramación de la tronadura y/o la evaluación de la cancelación de la tronadura durante el día.

Las condiciones meteorológicas adversas pueden ser varias, pero principalmente se destacan a considerar:

- ❖ Estabilidad atmosférica.
- ❖ Núcleo frio en altura.
- ❖ Cualquier otra condición meteorológica que pueda afectar la dispersión de MP.

En caso de que se haya programado una tronadura pero que por condiciones meteorológicas adversas se deba cancelar, será comunicado a través del portal de tronadura que estará disponible para la comunidad.



4.3 COMUNICACIÓN/DIFUSIÓN DE CONTINGENCIAS PLAN OPERACIONAL DE TRONADURAS CON LA COMUNIDAD Y AUTORIDADES

En caso de que ocurra algún evento de carácter natural y/o antropogénico que tenga como consecuencia, una contingencia operacional en la programación, ejecución y/o post tronadura, con la posibilidad de tener consecuencia ambiental para la comunidad, se procederá a ejecutar el protocolo que mantiene Codelco para estas situaciones donde, se avisará a las autoridades correspondientes y a la comunidad a través del diagrama definido en la Figura 22:

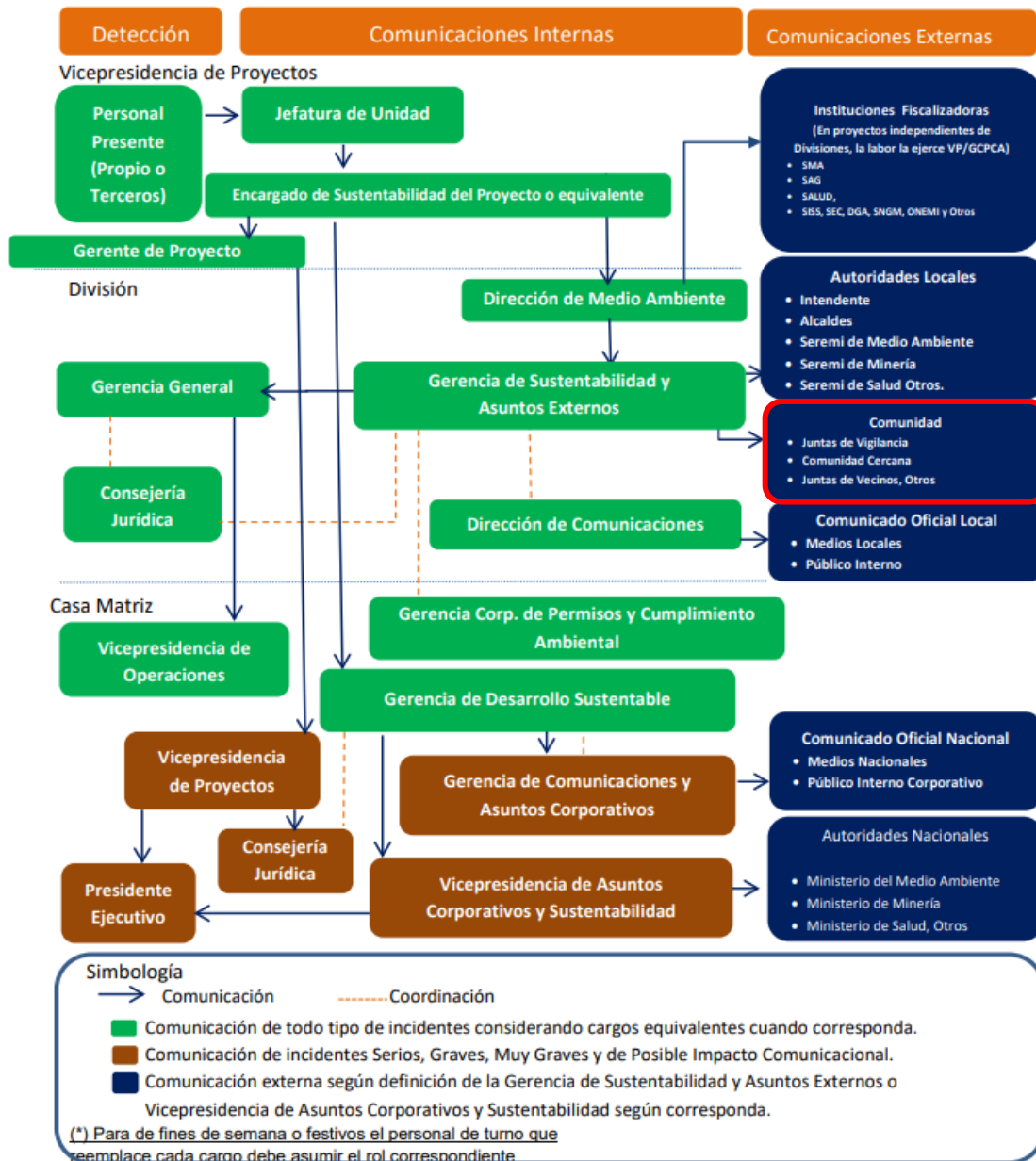


Figura 22. Flujo comunicacional contingencias Plan Operacional de Tronaduras con Comunidades y Autoridades

El área responsable de entregar y notificar esta información será la Gerencia de Sustentabilidad del Distrito Norte de Codelco a través de su área de Comunicaciones.

En caso de que se requiera realizar alguna solicitud y/o contacto con Codelco por algún tema relacionado a la ejecución de las Tronaduras, pueden ingresar la solicitud en la siguiente página WEB que mantiene Codelco.



Portal WEB para consultas, reclamos y/o sugerencias socioambientales:

<https://www.codelco.com/sustentabilidad/reclamos-sugerencias-socioambientales>

The screenshot shows the 'Sustentabilidad' (Sustainability) section of the CODELCO website. At the top, there is a navigation menu with links for 'Nosotros', 'Operaciones', 'Proyectos', 'Sustentabilidad', 'Innovación', 'Trabaja en Codelco', 'Transparencia', and 'Prensa'. A search icon is also present. Below the navigation, a teal banner displays 'Inicio > Sustentabilidad' and the word 'Sustentabilidad' in large white text. The main heading is 'RECLAMOS / SUGERENCIAS SOCIOAMBIENTALES'. Below this, a message states: 'Si desea realizar una consulta o comentario, por favor complete el siguiente formulario'. A green call-to-action bar features the phone number '800 222 600' and the text 'Haz tus Reclamos y Sugerencias Ambientales y Comunitarias', accompanied by the CODELCO and 'juntos' logos. The form itself includes a dropdown menu labeled 'División' for selecting the relevant division, and a 'Datos personales:' section with input fields for 'Nombre (*)' and 'ejemplo@mail.com (*)'.

Figura 23. Página WEB para ingresar solicitudes y/o contacto con Codelco



5. REPORTES

5.1 REPORTE DE TRONADURAS

Cada vez que se ejecute una tronadura por cada División, se generara un documento en formato no editable para dejar constancia de las condiciones meteorológicas observadas durante la ejecución de la tronadura y poder verificar el cumplimiento / no cumplimiento de lo indicado por el presente POT. Este reporte, estará disponible para la autoridad ambiental como también para la comunidad.

El reporte contendrá la dirección y velocidad del viento minutal durante el periodo definido para la evaluación, el cual corresponde a 15 minutos. A continuación, un ejemplo de cómo se desplegará la información en el reporte:

CODELCO Tronaduras				
División		Chuquicamata		
Cargo Responsable		Ingeniero Tronadura		
#	Fecha Tronadura	Velocidad m/s	Dirección	Estado
Inicio Seguimiento Tronadura				
1	28/11/2022 13:58:00	7.433	248.1	✓
2	28/11/2022 13:59:00	7.666	247.1	✓
3	28/11/2022 14:00:00	8.7	242.3	✓
4	28/11/2022 14:01:00	9.43001	221.8	✓
5	28/11/2022 14:02:00	7.183	222.7	✓
6	28/11/2022 14:03:00	4.699	249.7	✓
7	28/11/2022 14:04:00	6.272	264.4	✓
8	28/11/2022 14:05:00	7.485	221.2	✓
9	28/11/2022 14:06:00	7.482	226.5	✓
10	28/11/2022 14:07:00	7.574	249.7	✓
11	28/11/2022 14:08:00	6.975	225.4	✓
12	28/11/2022 14:09:00	7.984	218.1	✓
13	28/11/2022 14:10:00	8.44	222.8	✓
14	28/11/2022 14:11:00	8.77	233.2	✓
15	28/11/2022 14:12:00	8.45	253.1	✓
Fin Seguimiento Tronadura			Momento Tronadura	

Figura 24. Ejemplo reporte post tronadura.



Los reportes de tronaduras, estarán disponibles para la comunidad en el siguiente portal WEB:

<https://medioambiente.codelco.cl/portal>

Por otra parte, en el portal también se podrán ver las Tronaduras planificadas para el día como también para la semana de acuerdo con los programas productivos.

Finalmente, a través del portal, se podrán verificar las condiciones meteorológicas incorporadas por el POT en tiempo real:



Figura 25. Visor condiciones meteorológicas portal WEB de Tronaduras.

En caso de que se requiera acceder a los datos de calidad del aire de las estaciones monitoras que posee Codelco en la Ciudad de Calama, indicar que se pondrá a disposición un portal que se encuentra conectado con SINCA donde podrán visualizar los datos en tiempo real de la calidad del aire en la Ciudad a través del siguiente link: <https://medioambiente.codelco.cl/portal> o también en el portal creado por el MMA para el PDAC en el siguiente link: <https://airecalama.mma.gob.cl/>

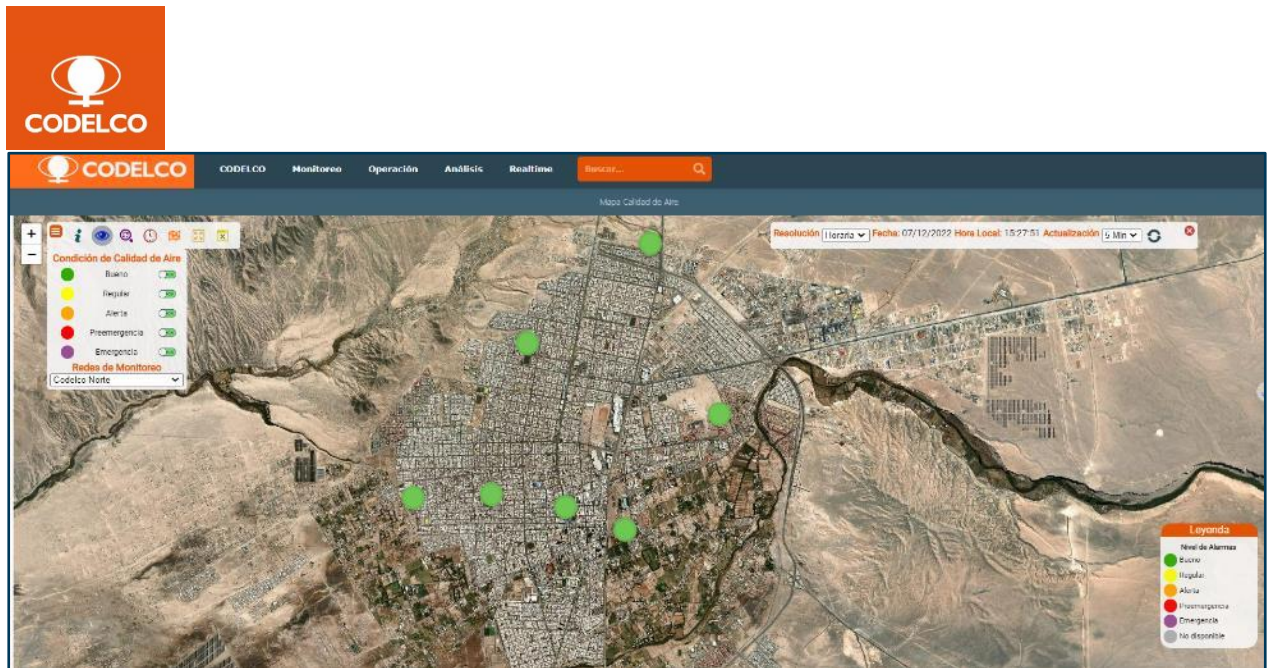


Figura 26. Visor portal WEB calidad del aire Calama de Codelco.

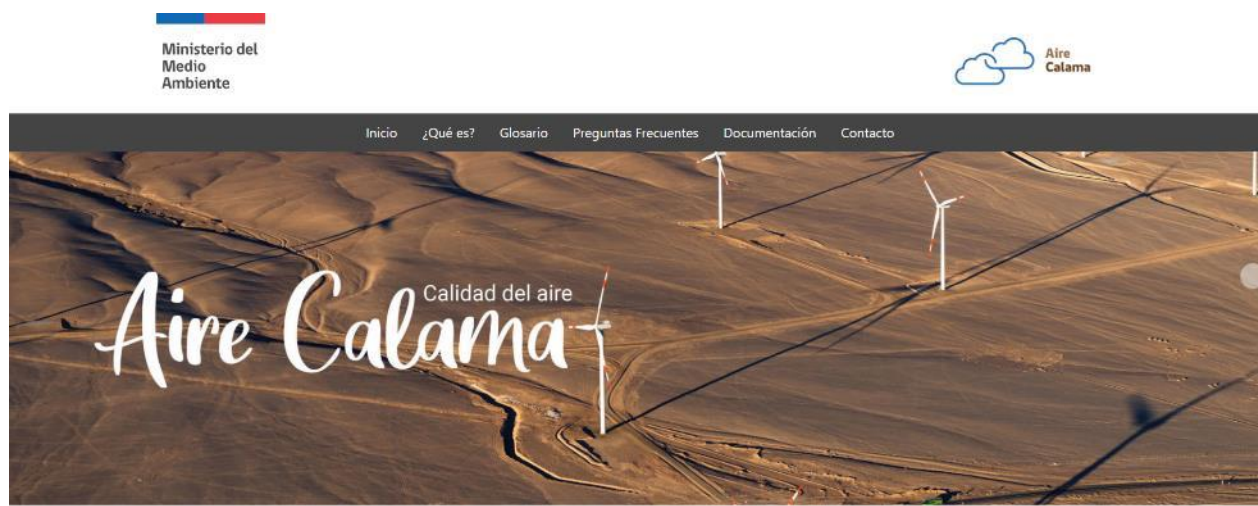


Figura 27. Portal Calidad del Aire Calama por el MMA por PDAC.

5.2 MONITOREO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS DEL POT

Con respecto a la calidad de los datos obtenidos por la red de monitoreo de Codelco, cabe mencionar que la operación y mantención de las estaciones meteorológicas, se encuentra externalizada a través de vínculo contractual con empresa externa.

Ahora bien, con respecto a la gestión del dato, Codelco posee un software denominado “AIRVIRO” donde en dos servidores (uno redundante), se almacenan los datos y al mismo tiempo, se



despliegan en tiempo real hacia distintos usuarios, entre ellos la autoridad ambiental (SMA y MMA) y también a la comunidad en general por los portales web antes indicados.

Este sistema de recolección y gestión de los datos se detalla en la Figura 27:

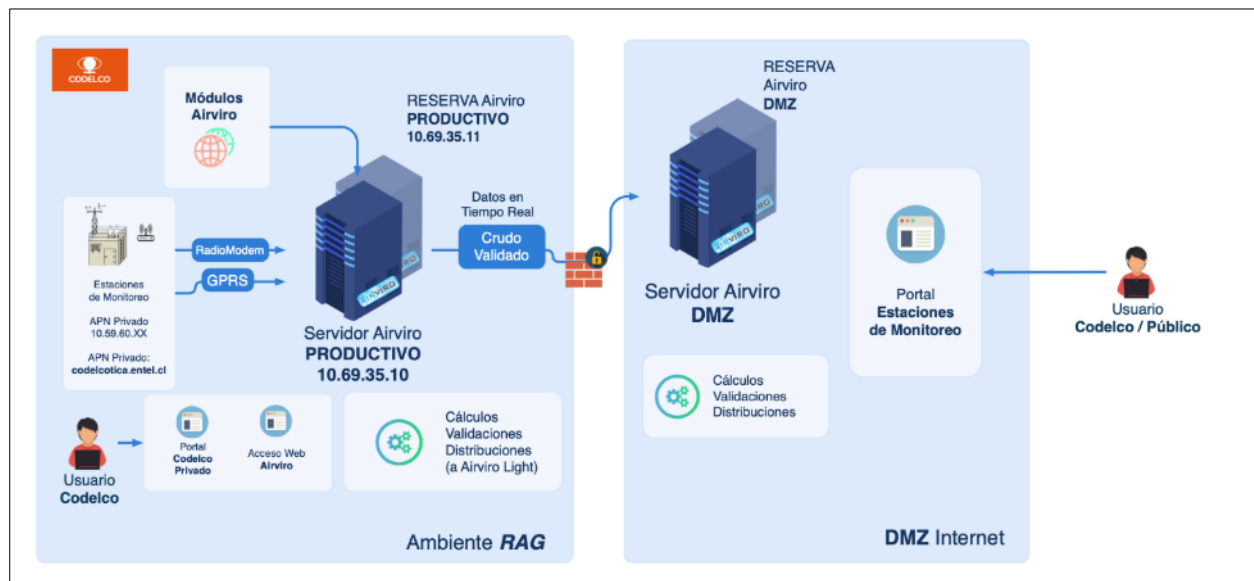


Figura 27. Diagrama gestión de datos de red de monitoreo de Codelco DN.

Mencionado lo anterior, Codelco posee dos servidores para el almacenamiento de los datos que se recolectan a través de la red de monitoreo ambiental desplegada en el cluster Calama, uno productivo y otro redundante. Estos funcionan 24 horas y 7 días a la semana.

Por otra parte, se realiza un seguimiento mensual a la disponibilidad de equipos de la red y al mantenimiento de estos de acuerdo con las guías definidas por los fabricantes de los equipos, mantenimiento a cargo del Operador de la Red.

Finalmente y para asegurar la continuidad del monitoreo en la estación definida para el seguimiento de las variables meteorológicas del POT, la estación “DMH Sur”, se instalara un sistema redundante para monitorear la dirección y velocidad del viento, esto quiere decir, se instalaran dos sensores en paralelo a los existentes, además, tendrá una conexión en línea distinta a la existente, con el objeto de mantener conexión con los servidores de Codelco en caso de que falle la conexión principal, y así de esta forma, asegurar el monitoreo continuo de las variables definidas como “críticas” por el presente Plan Operacional de Tronaduras.



Cabe destacar que, en caso de no contar con el monitoreo de la velocidad y dirección del viento por alguno de los dos sistemas de monitoreo (principal y redundante), debido a falla de los equipos o externalidades, las Tronaduras se suspenderán hasta contar con el monitoreo en línea.

6. ANEXO “FUNDAMENTO TÉCNICO PROTOCÓLO OPERACIONAL DE TRONADURAS”



Plan de Tronadura CODELCO Distrito Norte

7 DE DICIEMBRE DE 2022

Tabla de Contenidos

1 INTRODUCCIÓN.....	2
2 OBJETIVO	2
3 CARACTERÍSTICAS DE TRONADURAS EN CODELCO DN	3
4 MATERIALES Y MÉTODOS	5
5 SITUACIÓN METEOROLÓGICA TÍPICA EN LA ZONA DE CALAMA	7
6 ÁNGULO CRÍTICO	13
7 OTRAS VARIABLES METEOROLÓGICAS	20
8 CRITERIOS PARA TRONAR	21
9 PROTOCOLO DE TRONADURA	23

1 Introducción

En el Artículo 23 del *Plan de descontaminación para la ciudad de Calama y su área circundante* (PDAC), se señala “Los titulares de faenas mineras deberán implementar medidas para reducir la dispersión de polvo hacia la ciudad de Calama proveniente de tronaduras. Para ello, deben considerar las condiciones meteorológicas, tales como la dirección y velocidad del viento, entre otras.” y que dichos titulares deben presentar un “Plan Operacional que contenga las acciones para dar cumplimiento a la referida exigencia”.

En el presente documento, se efectúa una revisión de los criterios que se deben aplicar para realizar una tronadura en las divisiones de CODELCO Distrito Norte (CODELCO DN), justamente con el objetivo de “reducir la dispersión de polvo hacia la ciudad de Calama”.

Para dar un contexto de qué son las tronaduras y cuáles son sus características en general y en CODELCO DN en particular se incluye en la Sección 3 una descripción de ellas. Se considera importante fundamentar cualquier recomendación a través de un análisis de datos. Una breve descripción de los datos usados en este informe para tal análisis se da en la Sección 4. Tal como se indica en el PDAC, lo fundamental para la dispersión de material particulado emitido por tronaduras son las características meteorológicas en el momento. En la Sección 5, se detallan las características generales de los flujos prevalentes en la zona de Calama y CODELCO DN. La variable fundamental de estos flujos es la dirección del viento y, por lo tanto, debe ser central para el análisis (Sección 6). En la Sección 7, se entrega un breve análisis de las otras variables meteorológicas que se deben considerar dentro del plan operacional. Los criterios consolidados que se deben cumplir para poder realizar una tronadura se entregan en la Sección 8. Finalmente, en la Sección 9, se detalla el flujo de información del Plan Operacional propuesto.

2 Objetivo

El objetivo del presente documento es presentar un Plan Operacional de Tronaduras y fundamentar técnicamente los criterios de éste.

3 Características de tronaduras en CODELCO DN

Las Divisiones Ministro Hales (DMH), Chuquicamata (DCH) y Radomiro Tomic (DRT) son las faenas del DN que efectúan tronaduras en la zona que contempla el PDAC. El número de tronaduras por semana depende de la división; en DMH, es muy frecuente que se efectúan tronaduras todos los días, en DRT son aproximadamente cinco por semana y en DCH aproximadamente dos. En ningún caso, se trata de más de una tronadura por día. El horario en que se realizan las tronaduras es entre las 12:00 – 18:00 hrs.

No existe ninguna manera directa de medir las emisiones de una tronadura. Es práctica común para este tipo de emisiones, estimar su magnitud a través de los llamados “factores de emisión” (ver también Guía de emisiones del Servicio de Evaluación Ambiental¹). De hecho, gran parte de las estimaciones de emisiones del PDAC se basan en el uso de factores de emisión. En el caso de una tronadura, y usando el factor de emisión del PDAC, la magnitud de la emisión sólo depende del área en que se realiza una tronadura. Las áreas tronadas llegan hasta aproximadamente 10.000 m², lo que resultaría en una emisión de aproximadamente 100 kg/tronadura.

Dentro de un contexto minero, existen actividades con más emisiones (por ejemplo, la resuspensión de polvo en caminos no pavimentados) pero las emisiones asociadas a tronaduras probablemente se pueden considerar las más llamativas. Debido a que la emisión es en un instante de tiempo muy acotado, su impacto visual puede ser mayor que el de una emisión de mayor magnitud, pero que se distribuye por un periodo más largo. En la Figura 1, se entregan dos ejemplos del impacto visual desde Calama de unas tronaduras en DCH y DMH.



¹ “Recopilación y sistematización de factores de emisión al aire”, 2015.

https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/sistematizacion_de_factores_de_emision_al_aire_new.rar

Figura 1. Ejemplos de material particulado emitido en una tronadura de DCH (imagen a la izquierda) y de DMH (imagen a la derecha) y visible desde la ciudad de Calama.

El objetivo del Artículo 23 del PDAC es que las emisiones no causen un impacto en la calidad del aire en Calama. Es decir, se debe evitar que el material particulado proveniente de emisiones asociadas a las tronaduras, tales como se pueden observar en la Figura 1, se dirija a zonas pobladas.

4 Materiales y métodos

Dentro de este informe, se usan datos (a nivel de minuto) de las estaciones meteorológicas indicadas en la Tabla 1, para el periodo comprendido entre el 1 de enero del 2017 y hasta octubre de 2022. Todas las estaciones son parte de la red de monitoreo de CODELCO DN y cuentan con mediciones meteorológicas a nivel de un minuto. Mientras existen más estaciones meteorológicas en la zona, se considera que estas seis están **i)** bien emplazadas y **ii)** representan bien las características de los flujos meteorológicos en la zona. El punto i) es particularmente importante ya existen estaciones en la red que se ubican muy cerca de obstáculos como, por ejemplo, botaderos, lo que provoca que las mediciones de la dirección de viento en particular no sean muy representativas; un ejemplo de una estación mal emplazada (para los fines del presente informe) es la estación Fundición. También cabe mencionar que la red está operada en la actualidad por la empresa Algoritmos Spa.

Nombre de la estación	Este	Oeste	Altitud (m)
Centro Ecológico	516.338	7.543.687	2.854
Campamento	516.338	7543687	2.871
San José	509.175	7.522.299	2.736
Chuquicamata Superficial	508.514	7.519.533	2.489
DMH Sur	516.338	7.543.687	2.300
Calama Norte	516.338	7.543.687	2.296

Tabla 1. Ubicación UTM de las estaciones meteorológicas utilizadas en el informe.

En la Figura 2, se muestra la ubicación de las estaciones de medición; también se indican las ubicaciones de la ciudad de Calama, y los rajos de DMH, DCH y DRT.

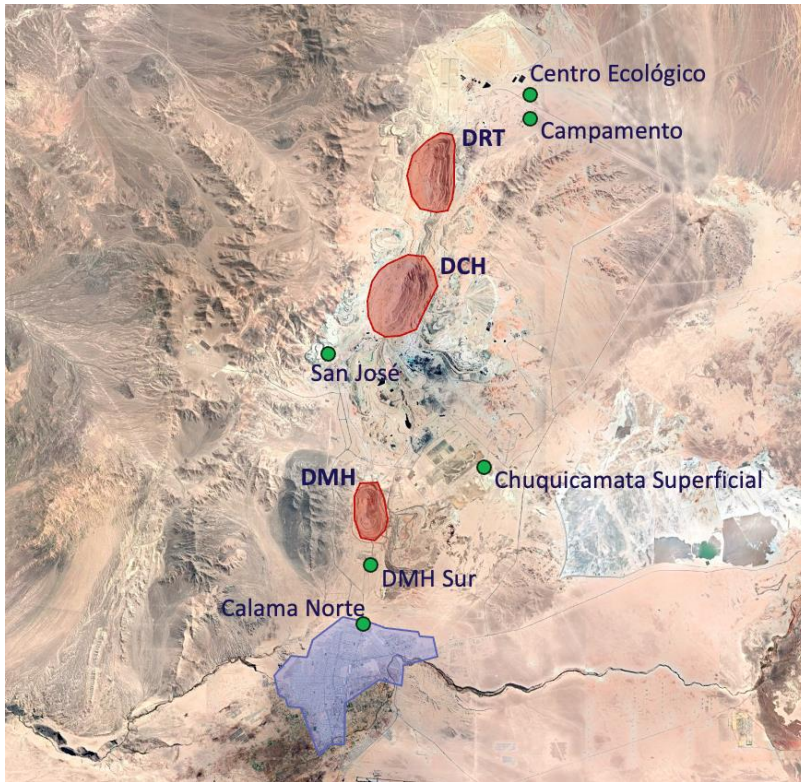


Figura 2. Ubicación de las estaciones usadas en el presente informe. También se indican las ubicaciones de la ciudad de Calama y de las faenas de DMH, DCH y DRT.

5 Situación meteorológica típica en la zona de Calama

En este informe, se tiene el enfoque en la calidad del aire. No obstante, el fundamento de la calidad del aire, en general, y en Calama, en particular, se asocia fundamentalmente con procesos meteorológicos. Estaría fuera del contexto del presente informe, llegar a una caracterización detallada de todos los procesos meteorológicos de la zona por lo que, en esta sección, se entrega una descripción de los flujos atmosféricos más importantes y en términos más bien conceptuales. Esta descripción se basa en las mediciones en la zona y en modelos numéricos (ver también Muñoz et al, 2018², y Jacques-Coper et al, 2014³).

En términos generales, los ciclos diarios de los vientos en la zona se deben a la presencia de una brisa valle montaña cuya variabilidad se debe al forzante radiativo lo que implica que se repiten todos los días y con una cierta variabilidad estacional. Estas brisas se caracterizan por un viento que sopla desde el valle hacia la montaña durante el día y desde la montaña hacia el valle durante la noche. En las Figuras 3 y 4, se indican los flujos de la zona que son relevantes para la calidad del aire en Calama para los periodos día y noche, respectivamente.

En la Figura 3, se muestra la brisa diurna desarrollada; esta brisa se caracteriza por flujos aproximadamente homogéneos desde el oeste hacia al este. La flecha verde indica el flujo principal de la zona cuya dirección está dominada por la presencia de la cordillera y modulada, en algún grado, por el valle del río Loa. Las flechas amarilla, roja y azul indican leves desviaciones de este flujo principal, generadas por la topografía compleja en la zona. Bajo esta configuración diurna, las masas de aire que llegan a Calama no están expuestas a mayores fuentes emisoras desde el oeste hacia la ciudad.

Por otro lado, los flujos atmosféricos nocturnos muestran mayor complejidad. En primer lugar, en la Figura 4, se indica un flujo principal a lo largo del valle del río Loa (flecha verde). Este flujo proviene del norte de San Francisco de Chiu-Chiu; después de haber pasado por esta localidad, cambia a dirección este y hacia Calama; llegando a Calama, el flujo adquiere nuevamente una leve componente norte. Finalmente y una vez saliendo de Calama, el flujo es principalmente desde el este. Alrededor de este flujo principal, se pueden observar tres circulaciones secundarias. En primer lugar (flecha amarilla), existe una circulación anticiclónica (en contra del sentido del reloj) que viene desde el sur entre Chiu-Chiu y Calama; cambia a dirección desde el este hacia Calama y se une al flujo principal en las cercanías de la ciudad. En segundo lugar (flecha roja), se observa una circulación ciclónica (en el sentido del reloj) que, en la parte norte de la zona industrial de Codelco, tiene una dirección desde el oeste; se desvía hacia el sur y, antes de llegar a Calama, confluye con el flujo principal. Finalmente, existe un flujo principal y se desvía hacia el oeste.

² Muñoz, R.C., M.J. Falvey, M. Arancibia, V.I. Astudillo, J. Elgueta, M. Ibarra, C. Santana, and C. Vásquez, 2018: Wind Energy Exploration over the Atacama Desert: A Numerical Model-Guided Observational Program. Bull. Amer. Meteor. Soc., 99, 2079–2092, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0019.1>

³ Jacques-Coper M., M. Falvey, R. Muñoz (2014) Inter-daily variability of a strong thermally-driven wind system over the Atacama Desert of South America: synoptic forcing and short-term predictability using the GFS global model. *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-014-1231-y

Dentro del contexto del presente informe, sólo son de interés los flujos diurnos ya que el horario para tronaduras se restringe entre las 12:00 – 18:00 hrs.

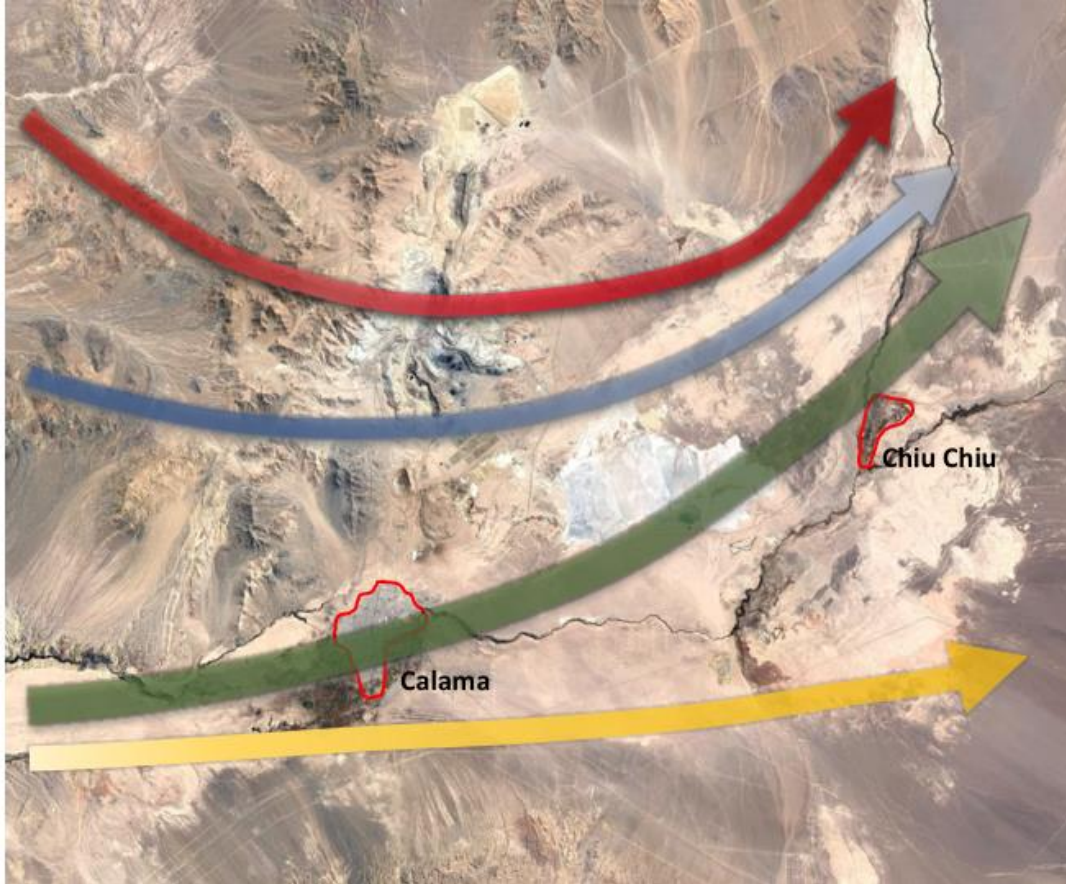


Figura 3: Flujos conceptuales diurnos en la zona de Calama y su área circundante. La flecha verde indica el flujo principal de la zona cuya dirección está dominada por la presencia de la cordillera y modulada en algún grado por el valle del río Loa. Las flechas amarilla, roja y azul indican leves desviaciones de este flujo principal, generadas por la topografía compleja en la zona.



Figura 4: Flujos conceptuales nocturnos en la zona de Calama y su área circundante. La flecha verde indica el flujo principal a lo largo del valle del río Loa. Las flechas amarilla, roja y azul indican circulaciones secundarias al flujo principal.

Estos flujos conceptuales, se reflejan en los ciclos diarios de la dirección de viento en las estaciones Calama Norte, DMH Sur, DCH Superficial, San José, Centro Ecológico y Campamento RT. En la Figura 5, se muestran los ciclos diarios en cada una de estas estaciones, a modo de ejemplo, para la semana entre el 12 y 18 de enero del 2022 se puede observar que, durante toda la tarde, los flujos tienen una dirección del oeste/suroeste en el horario de las tronaduras entre las 12:00 – 18:00 hrs (este horario se indica con la sombra rosada). Debido a que este flujo típico se mantiene, generalmente, por varias horas, también se puede llamar “estable” y, además, como no sopla hacia Calama como “favorable”.

Comportamiento de la dirección del viento: 2022/01/10

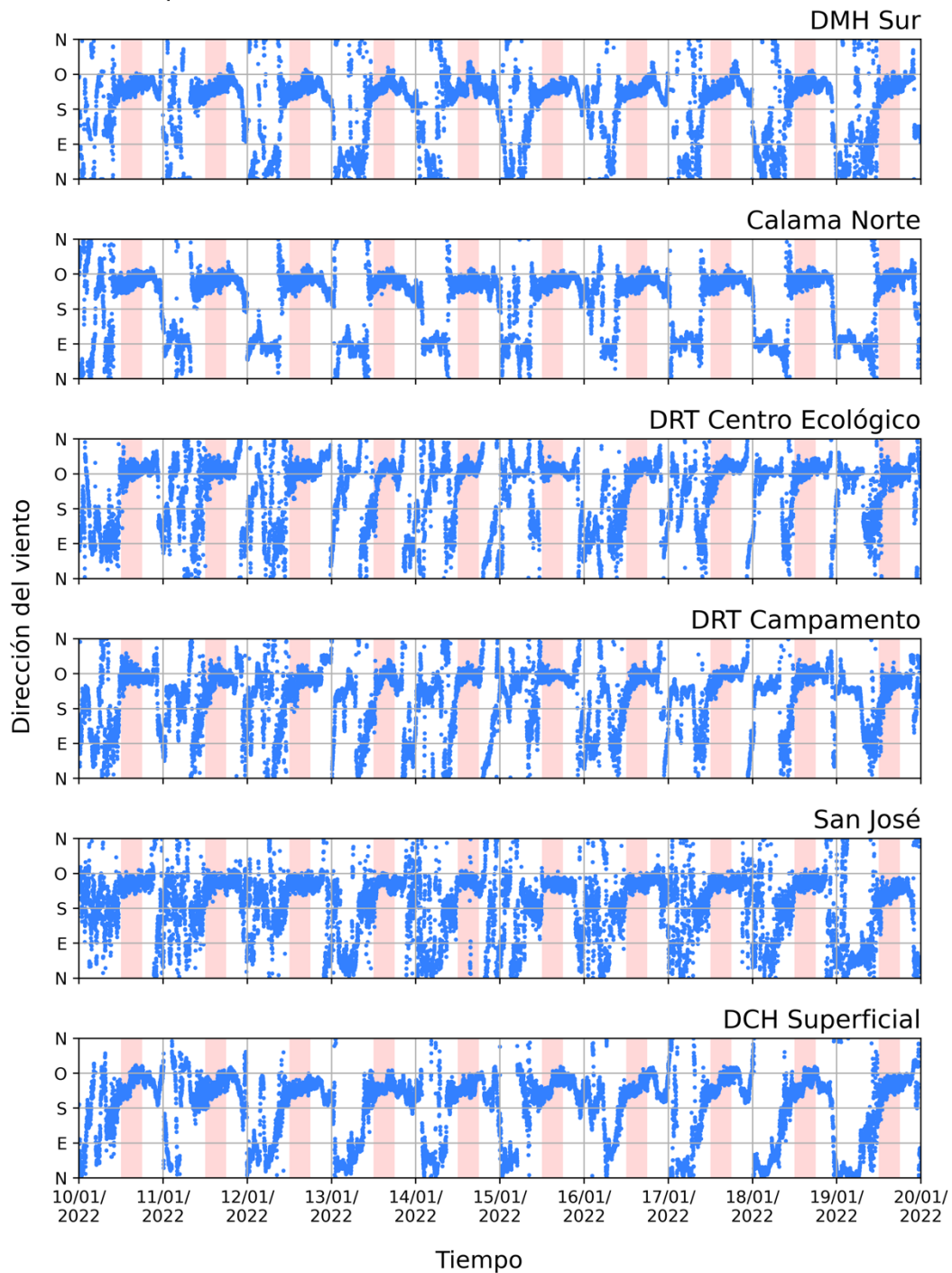


Figura 5. Series de tiempo de la dirección de viento de las estaciones DMH Sur, Calama Norte, DRT Centro Ecológico, DRT Campamento, San José Y DCH Superficial. Se muestran los datos a nivel minuto en el periodo entre el 12 y 18 de enero del 2022. Las sombras rosadas indican el horario entre las 12:00 – 18:00 hrs.

Existen fenómenos meteorológicos de gran escala (a la que también se refiere como “sinóptica”) que pueden perturbar esa brisa valle-montaña como, por ejemplo, un núcleo frío o una corriente en chorro en altura. Esas perturbaciones se presentan pocas veces al año (según Reyes y Shao⁴, se presentan unas cuatro veces al año), y se reflejan muchas veces en direcciones de viento con una componente desde el norte. En la Figura 6, se muestra un ejemplo de este fenómeno. También para este caso, se muestran las direcciones de viento para las mismas estaciones que en la Figura 5, sólo que para la semana entre 26 de mayo y 08 de junio del 2020. Se puede observar que entre el 03-05 de junio, no se establece el ciclo diario típico y se presenta una componente del norte más pronunciada durante estos días. En este caso, se presenta una condición que se debe considerar “desfavorable” para tronaduras.

⁴ M. Reyes and Shao Y, 2019, Cutoff lows off the coast of the Atacama Desert under present day conditions and in the Last Glacial Maximum, Global and Planetary Change, Vol. 181, 102983, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102983>

Comportamiento de la dirección del viento: 2020/05/26

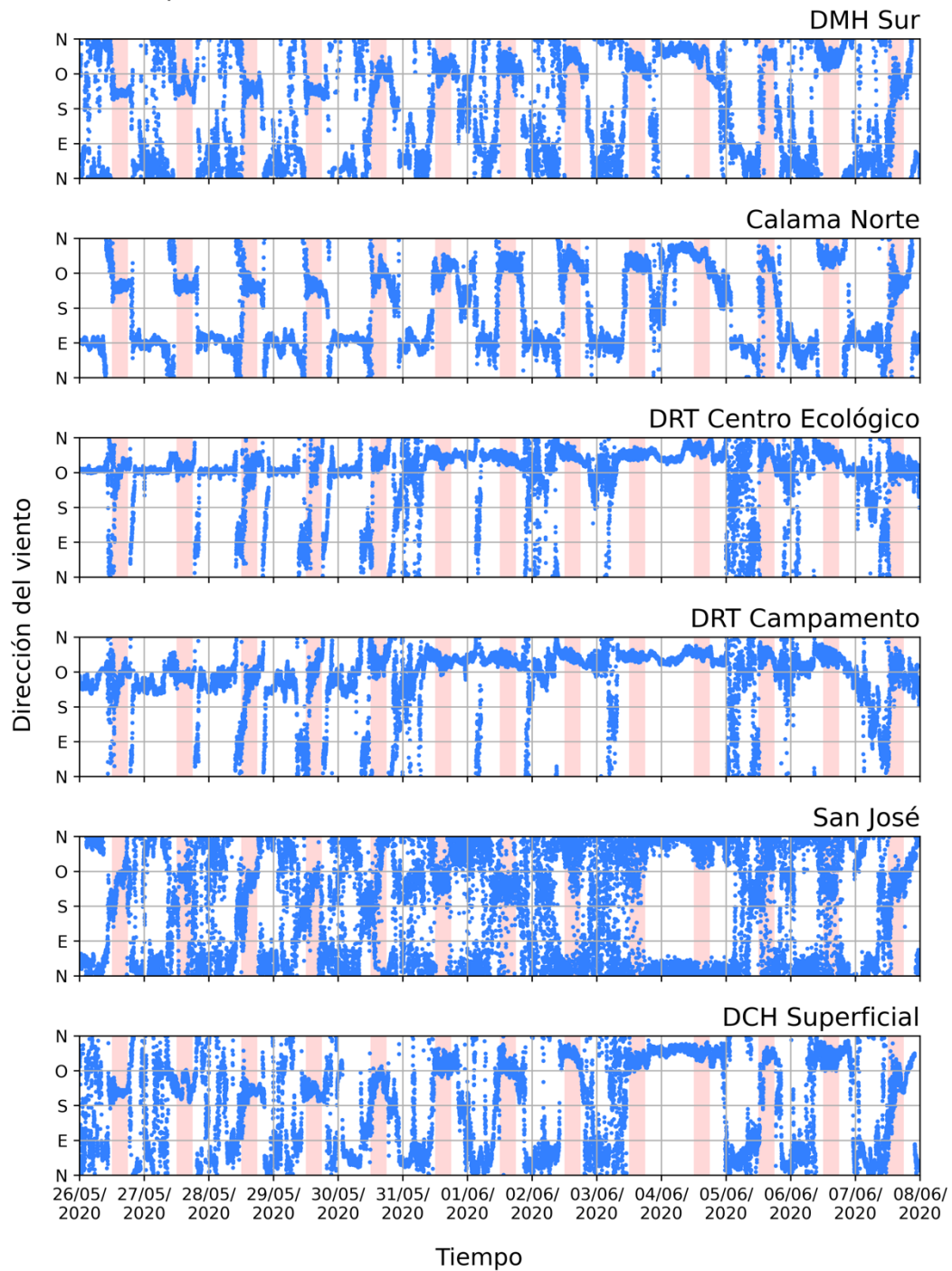


Figura 6. Series de tiempo de la dirección de viento de las estaciones DMH Sur, Calama Norte, DRT Centro Ecológico, DRT Campamento, San José Y DCH Superficial. Se muestran los datos a nivel minuto en el periodo entre el 26 de mayo y 08 de junio del 2020. Las sombras rosadas indican el horario entre las 12:00 – 18:00 hrs.

6 Ángulo crítico

En la sección anterior, se indicó que el flujo típico en la zona de Calama y el área industrial de CODELCO DN se genera a través de la brisa valle-montaña. Los flujos que se generan a través de esta brisa durante el día se deben considerar “favorables” para la realización de tronaduras ya que se dirige desde las faenas hacia al este/noreste y, por lo tanto, evita que las emisiones puedan llegar a las áreas pobladas de la zona.

En esta sección, se busca determinar las condiciones idóneas para las tronaduras en términos de la dirección de viento para DMH, DCH y DRT. En la actualidad, y según RCA 240/2010, Sección 3.2.1a, DMH genera a nivel trimestral un informe de tronaduras para la Superintendencia y declara:

“Para determinar si el material particulado de alguna tronadura podría haber afectado la zona de Calama, se analiza la dirección de viento. Como se ilustra en la Figura 7, los vientos que afectan a la zona de Calama (tomando la dirección desde donde provienen) se encuentran entre NNW-N ($337,5^\circ - 360^\circ$) y N – NNE ($0^\circ - 22,5^\circ$), lo que equivale a una proyección hacia S– SSW ($180^\circ - 202,5^\circ$) y S – SSE ($157,5^\circ - 180^\circ$). Los vientos dentro de este rango se clasifican como direcciones adversas. Vientos de cualquier otra dirección se consideran favorables para tronadura.” (En lo que sigue, se refiere a esas direcciones adversas como “ángulo crítico RCA 240”.)

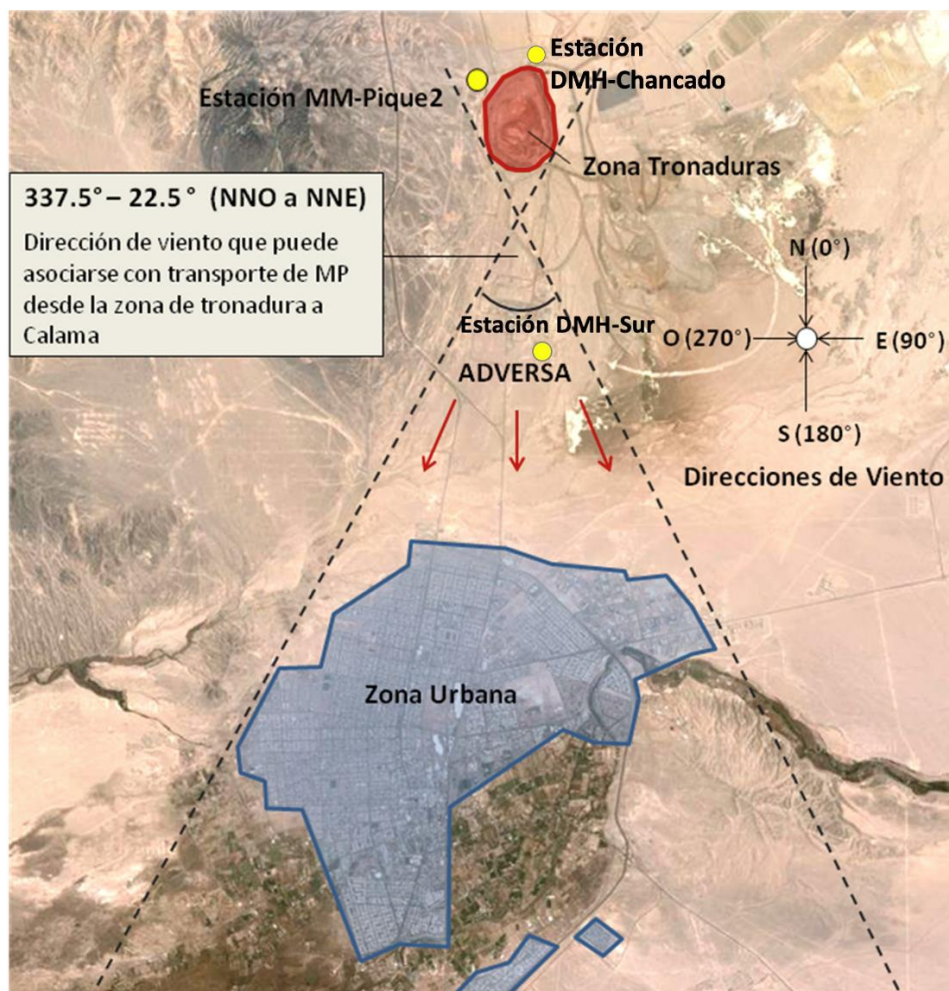


Figura 7. Mapa de la zona de estudio. Los círculos amarillos indican la ubicación de las estaciones meteorológicas de referencia MM-Pique2 (no operativa) y DMH-Sur (activa). La zona donde se realizan tronaduras (la mina) está indicada con el polígono rojo. La zona urbana está delimitada en azul. El cuadrante de dirección de viento adversa, que podría resultar en un desplazamiento de material particulado emitido durante una tronadura hacia la zona urbana se indica con las líneas segmentadas.

La estación de referencia que se usa en el informe es la estación DMH-Sur.

Mientras que se considera idónea la estación DMH-Sur como estación de referencia para las tronaduras en DMH, dentro del PDAC, se considera pertinente evaluar los siguientes dos puntos: i) ¿qué tan representativa es la estación DMH-Sur? y ¿cuáles serían las estaciones de referencia idóneas para las tronaduras en DCH y DRT?

6.1 Representatividad de la estación DMH-Sur

Tal como se mencionó en la Sección 4, los flujos típicos en la zona de interés se generan por una brisa valle-montaña. Las características de estas brisas, en términos de dirección y velocidad del

viento, dependen, a su vez, de la topografía. Debido a que el terreno en la zona de interés se puede definir como “terreno complejo”, se debe evaluar qué tan representativa es la dirección de viento que se mide en DMH-Sur y, en particular, con respecto a flujos hacia Calama. Para esta evaluación se considera pertinente, comparar las mediciones de la dirección de viento de la estación DMH-Sur y la estación Calama Norte, la que corresponde a la estación “urbana” más próxima a la zona industrial de CODELCO DN.

En la Figura 8, se comparan las rosas de viento de la estación DMH Sur (panel izquierdo) y Calama Norte (panel derecho). Sólo se muestran datos para el horario 12:00 – 18:00 hrs. La sombra rosada indica el ángulo crítico RCA 240. Se puede observar que, a pesar de algunas diferencias entre ambas estaciones, las rosas de ambas estaciones tienen características muy similares e indican el flujo dominante diurno fuera del ángulo crítico (a pesar de que es muy poco frecuente, también existen datos en ambas estaciones se encuentran dentro del ángulo crítico RCA 240).

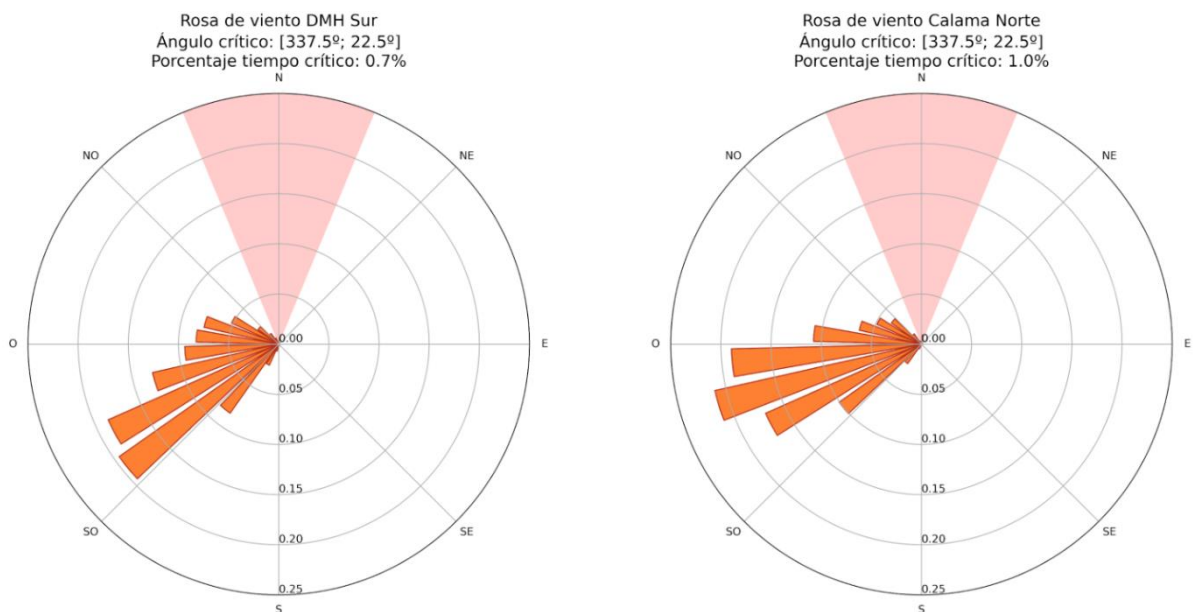


Figura 8. Rosas de viento para la estación DMH Sur (panel izquierdo) y Calama Norte (panel derecho) considerando todos los datos entre las 12:00 – 18:00 hrs.

En la Figura 9, se muestra la misma información de la Figura 8, pero en términos de una densidad de probabilidad para DMH Sur (panel superior) y Calama Norte (panel inferior). La franja de color rosado indica el ángulo crítico RCA 240, mientras que la línea azul la dirección promedio. Se puede observar que las distribuciones son muy parecidas y, además, los promedios tienen valores similares (con una diferencia de 7,8°). En este contexto, se puede decir: 1) la estación DMH Sur representa bien los flujos entre DMH y Calama, y se considera idónea como estación de referencia. 2) A pesar de la similitud de las dos estaciones, existen diferencias y se considera pertinente que estas diferencias se reflejen en un nuevo ángulo crítico; se propone ampliarlo por la diferencia promedio por ambos lados, lo que resultaría en la nueva definición del ángulo crítico según:

Ángulo crítico = 329,7° – 30,3°

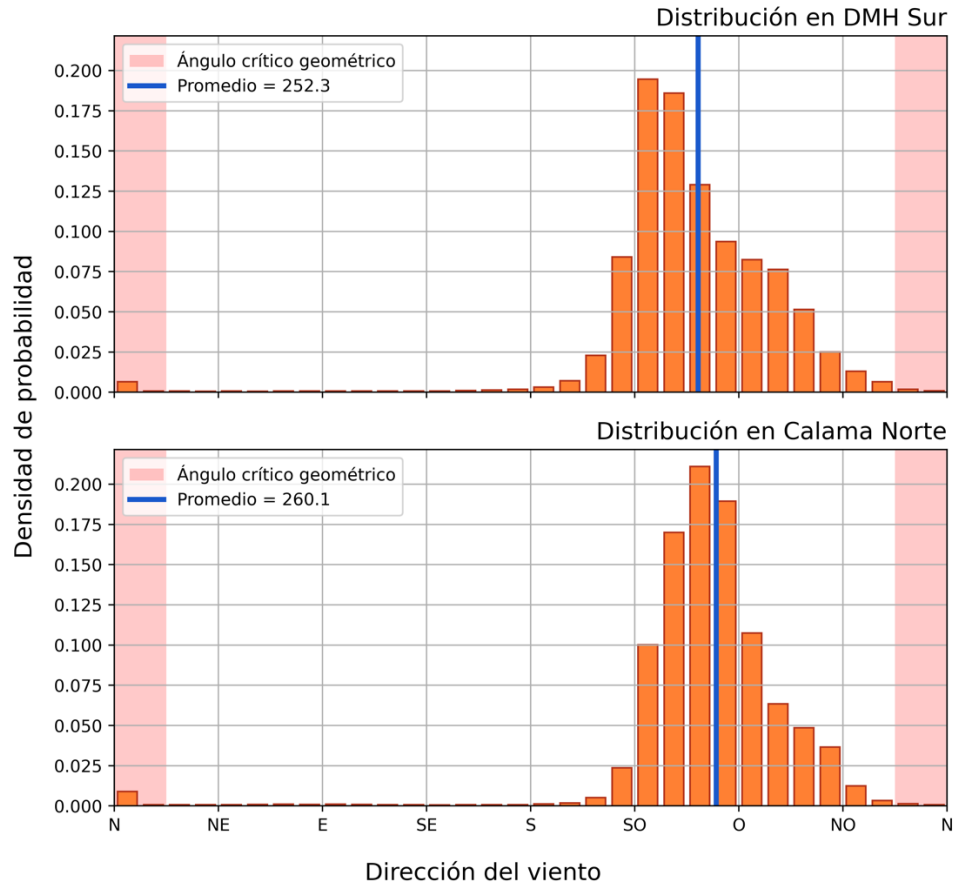


Figura 9. Densidad de probabilidad para la dirección de viento en las estaciones DMH Sur (panel superior) y Calama Norte (panel inferior). La sombra rosada indica el ángulo crítico RCA 240, mientras que la línea azul la dirección promedio.

6.2 Divisiones DCH y DRT

En lo expuesto anteriormente en esta sección, la discusión se limitó a DMH. En lo que sigue, se consideran también DCH y DRT. En primero lugar, en la Figura 10 se muestra el mismo mapa de la Figura 2, pero se incluyen las líneas para los ángulos críticos geométricos para cada división; estos ángulos son entre 337,5 – 22,5 para DMH (líneas negras), 355,2 y 29,7 para DCH (líneas rojas) y 359,2 y 17,3 para DRT (líneas verdes). Se puede observar que los ángulos son similares, pero se ponen más estrechos alejándose de Calama.

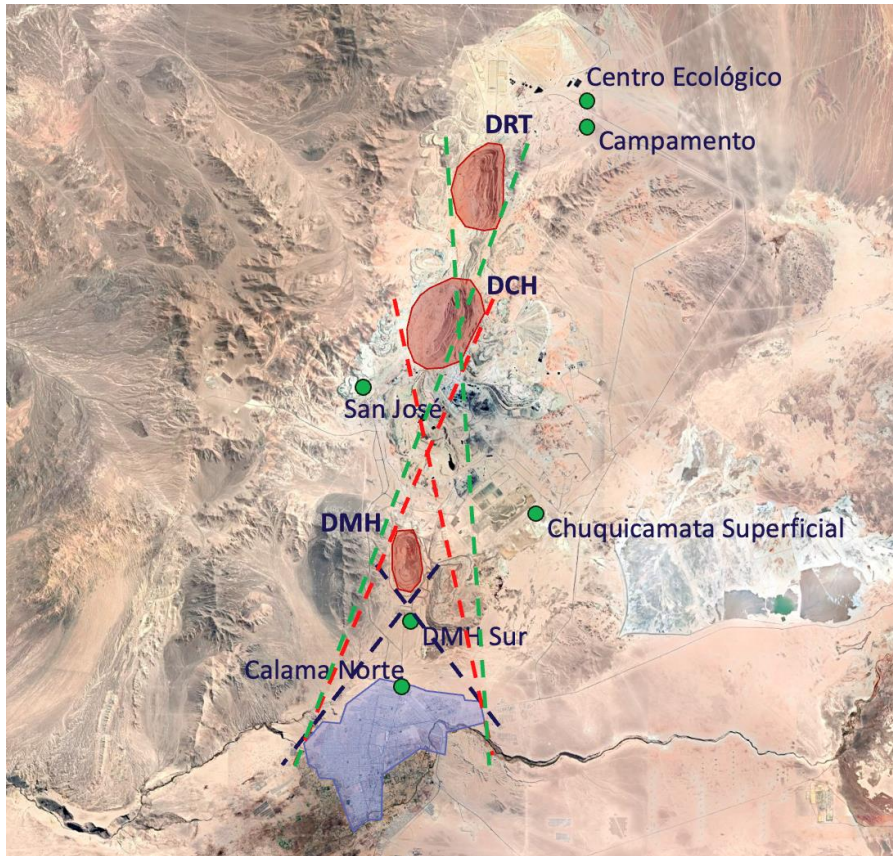
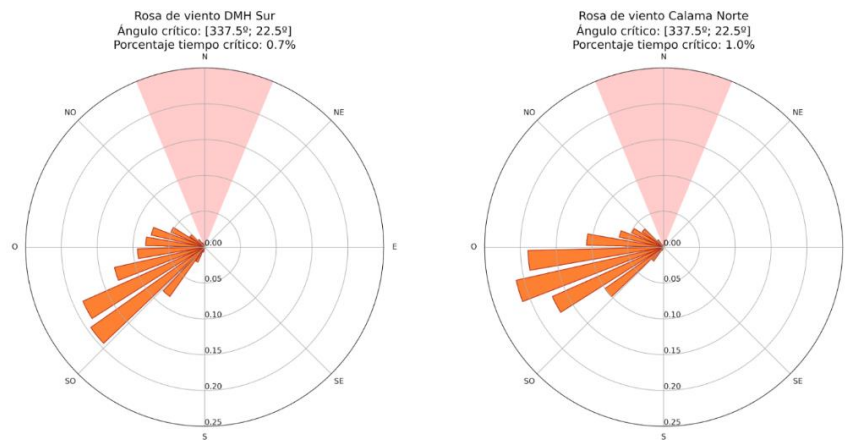


Figura 10. Ángulos críticos geométricos para cada división; estos ángulos son entre $337,5 - 22,5$ para DMH (líneas negras), $355,2$ y $29,7$ para DCH (líneas rojas) y $359,2$ y $17,3$ para DRT (líneas verdes) y

En la Figura 11, se muestran las rosas de viento de las estaciones DMH Sur y Calama Norte (en representación de DMH), San José y DCH Superficial (en representación de DCH) y Campamento y Centro Ecológico (en representación de DRT), nuevamente para el horario 12:00 – 18:00 hrs. En cada rosa de viento, los ángulos críticos según criterios geométricos (y consistente con la Figura 10) se muestran a través de la sombra rosada.



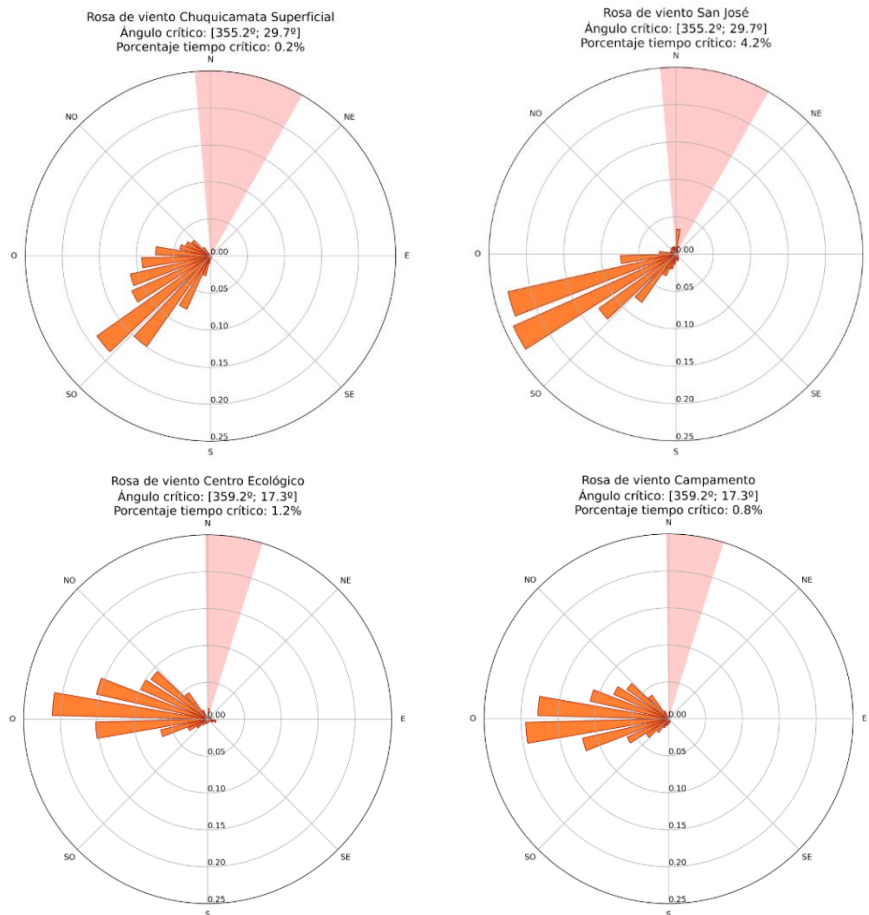


Figura 11. Rosas de viento de las estaciones DMH Sur y Calama Norte (en representación de DMH), San José y DCH Superficial (en representación de DCH) y Campamento y Centro Ecológico (en representación de DRT) para el horario 12:00 – 18:00 hrs.

Mientras las características de la mayoría de las estaciones confirman los flujos dominantes dibujados esquemáticamente en la Figura 3, también se puede observar diferencias entre las estaciones, lo que, a su vez, confirma la influencia de un terreno complejo en la zona de interés.

Para definir los ángulos críticos para DCH y DRT y elegir sus respectivas estaciones representativas, se pueden contemplar las siguientes dos aproximaciones: *específica*) cada faena cuenta con un ángulo crítico propio y una estación representativa cercana o *generalizada*) se ocupan los mismos criterios de DMH para DCH y DRT. Ambas aproximaciones tienen sus ventajas y desventajas.

6.2.1 Alternativa *específica*

Ventajas

- Características específicas para cada división

Desventajas

- Tal como se puede ver en la Figura 10, las estaciones meteorológicas “representativas” para DCH y DRT no representan los flujos dentro de los ángulos críticos.
- Siendo *específica* la alternativa, se tendría que usar una estación particular para cada división. No obstante, según la Figura 10, es evidente que cualquier flujo – desde DCH y DRT- debe pasar por la estación DMH Sur, que parece mucho más idónea también para estas divisiones.
- Se debe aplicar criterios levemente distintos a todas las divisiones, que en la práctica no generan mucha diferencia. Además, la labor de fiscalización del sistema se puede volver más engorrosa debido a estas diferencias de criterio.

6.2.2 Alternativa *generalizada*

Ventajas

- Según la Figura 10, es evidente que cualquier flujo – desde DCH y DRT- debe pasar por la estación DMH Sur que parece mucho más idónea también para estas divisiones. El ángulo crítico establecido para DMH se debe considerar necesario y suficiente también para DCH y DRT.
- Los ángulos críticos geométricos de DCH y DRT están incluidos dentro del ángulo crítico evaluado para DMH, por lo que la estación DMH Sur debería dar un criterio robusto también para DCH y DRT.
- Un sistema con una sola estación es más simple y robusto de usar. Debido a su uso operacional, se puede pensar en implementar redundancia en términos de sensores como en la comunicación de los datos (incluyendo comunicación satelital).
- Esta alternativa es más fácil de explicar para un público general.

Desventajas

- No se visualizan desventajas de esta alternativa.

Debido a lo anteriormente expuesto, se recomienda optar por la alternativa **generalizada** y usar la estación DMH y su ángulo crítico asociado como representativo de todo el DN.

7 Otras variables meteorológicas

En la dispersión de contaminantes, se pueden considerar como importantes las variables de la dirección y de la velocidad del viento y la temperatura. La dirección de viento es la que determina hacia dónde se transporta un contaminante mientras la velocidad del viento determina qué tan rápido se alejan los contaminantes de su fuente emisora. A su vez, la dilución de los contaminantes depende del perfil vertical de la temperatura (con la que se puede evaluar la llamada estabilidad atmosférica).

No existe información sobre el perfil vertical de la temperatura en la zona por lo que no se considera la temperatura en el presente análisis.

La importancia de la dirección del viento ya fue abordada en la Sección 5 del presente informe.

Con respecto a la velocidad del viento -y dentro del contexto de una tronadura- sólo parece evidente que no se deben realizar tronaduras en situaciones de calma. La escala que se usa comúnmente para cuantificar términos descriptivos con relación a la velocidad del viento es la escala de Beaufort. En esta escala, se define calma como una velocidad de viento entre 0-1 km/h (equivalente a 0-0,28 m/s). Este umbral (de 1 km/h) es muy bajo, incluso para algunos sensores meteorológicos. Dentro del contexto de las tronaduras, parece razonable aplicar un factor de seguridad a ese umbral. Se recomienda como **criterio una velocidad mayor o igual de 2 m/s** (o 7,2 km/hr), o sea 7,2 veces mayor que el umbral superior de la definición de calma. Cabe mencionar que estas velocidades tan bajas se presentan, suponiendo una situación de la dirección de viento favorable, en menos de un 1% de las oportunidades (ver también Figura 11).

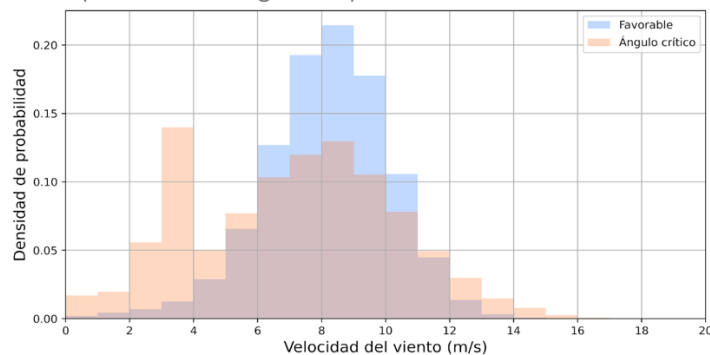


Figura 11. Densidad de probabilidad de la velocidad del viento en la estación DMH Sur considerando el horario entre las 12:00-18:00 hrs. En celeste, se indica la distribución en condiciones favorables, en naranja, la de cuando la dirección está dentro del ángulo crítico.

8 Criterios para tronar

En las Secciones 5 y 6, se estableció que la estación DMH Sur debería ser la estación de referencia para las tres divisiones de CODELCO DN, que el ángulo crítico debe ser entre $329,7$ y $30,3^\circ$, y que sólo se debe tronar con una velocidad del viento mayor o igual de 2 m/s.

En la actualidad, se evalúa la posibilidad de si se puede tronar o no, con el dato del momento. No obstante, se considera que usar un solo dato no necesariamente representa un criterio robusto; o sea, se debería haber establecido en una cierta ventana temporal anterior al momento mismo que la situación con respecto a la dirección y velocidad del viento es estable.

En lo que sigue, se evalúa justamente esta ventana temporal con la dirección del viento según la Figura 12. En esta evaluación se determina, qué significaría una situación “estable” en una ventana temporal que va desde 1 hasta 30 minutos antes del “momento de una tronadura”, y luego otra ventana para los siguientes 10 minutos⁵. Se define, en este caso, una situación estable, en que todos los valores, con excepción de uno, deben estar fuera del ángulo crítico (considerando la característica turbulenta de la atmósfera durante el día, se estima que puede haber un valor dentro del ángulo crítico sin que se considere una situación desfavorable). Como “momento de tronadura” se consideran todos los minutos dentro de las 12:00 – 18:00 hrs y con todos los datos desde 1 de enero del 2017 hasta 31 de octubre del 2022.

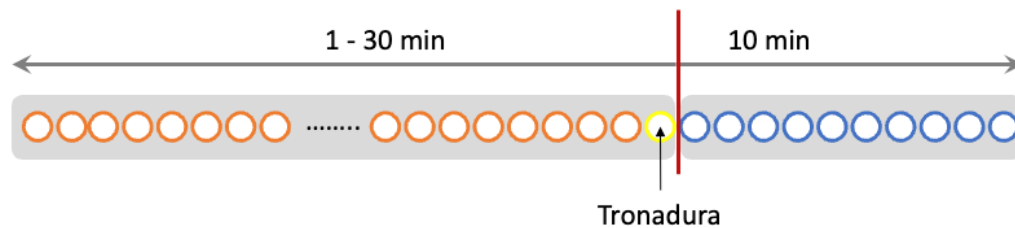


Figura 12. Esquema de las ventanas evaluadas antes y después del momento de la tronadura.

En la Figura 13, se muestra el resultado de esta evaluación para la estación de referencia DMH Sur. En el eje x, se muestra el ancho temporal de la ventana y en el eje y la probabilidad de que se presente una situación favorable en la ventana anterior del momento de la tronadura y una situación desfavorable en la ventana 10 minutos después de la tronadura.

Se puede ver que una ventana mayor con una situación favorable disminuye la probabilidad de que se presente una situación desfavorable en los siguientes 10 minutos (o aumenta la probabilidad de que los siguientes 10 minutos sean favorables). Los cambios mayores en la probabilidad se observan entre los minutos 1 y 15; las mejoras con ventanas mayores de 15 minutos sólo son marginales (la diferencia entre 15 y 30 minutos es sólo aproximadamente un 0,25%). En este contexto, se recomienda una ventana de 15 minutos, lo que asegura que la probabilidad de una situación favorable después de una tronadura es igual o mayor a 99%.

⁵ Suponiendo la velocidad mínima permitida para una tronadura de 2 m/s, una pluma emitida por una tronadura se aleja de la fuente por unos $1,2$ km. Se puede suponer que es una distancia suficiente en la que la pluma ya no se visible.

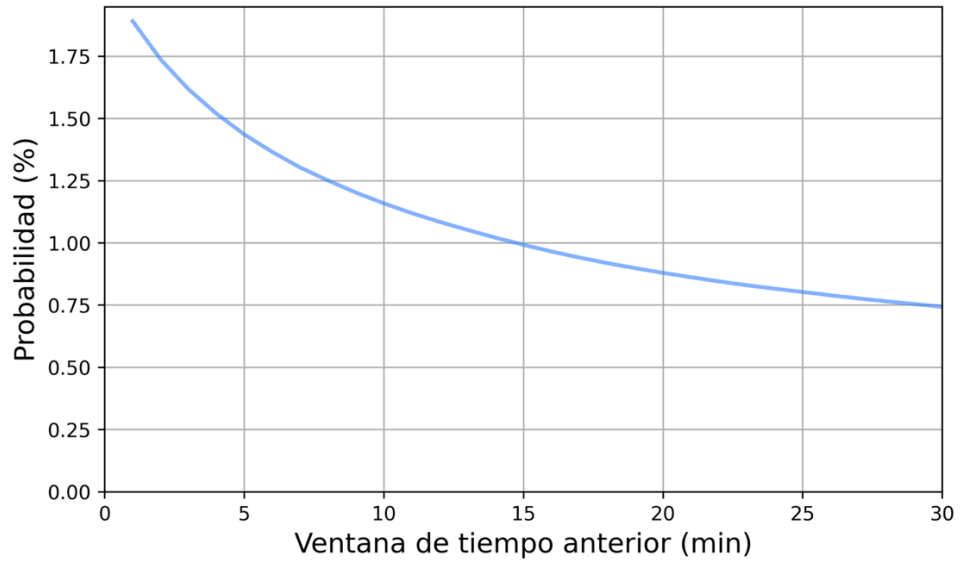


Figura 13. Probabilidad de que se presente una situación favorable en la ventana anterior del momento de la tronadura y una situación desfavorable en la ventana 10 minutos después de la tronadura.

9 Protocolo de tronadura

En la Figura 14, se presenta un esquema del protocolo que se debe seguir para poder realizar una tronadura en DMH, DCH o DRT. El protocolo sólo aplica entre las 12:00-18:00 hrs. Aunque se presentan condiciones favorables afuera de eso horario, no se permite realizar tronaduras.

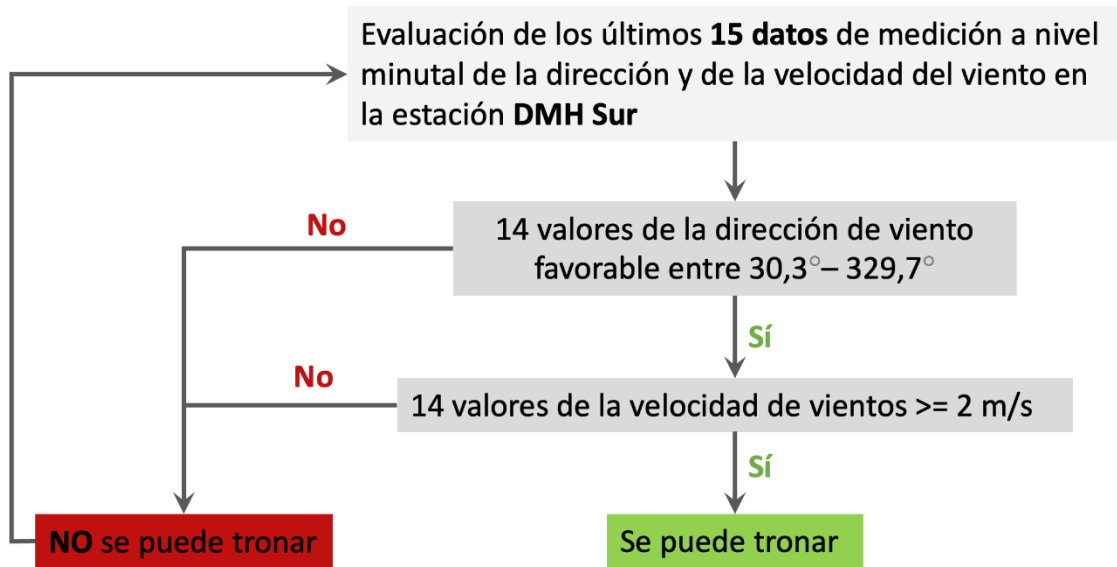


Figura 14. esquema del protocolo que se debe seguir para poder realizar una tronadura en DMH, DCH o DRT.

Se considera que este protocolo es simple de implementar a nivel operacional como también es fácil de fiscalizar.