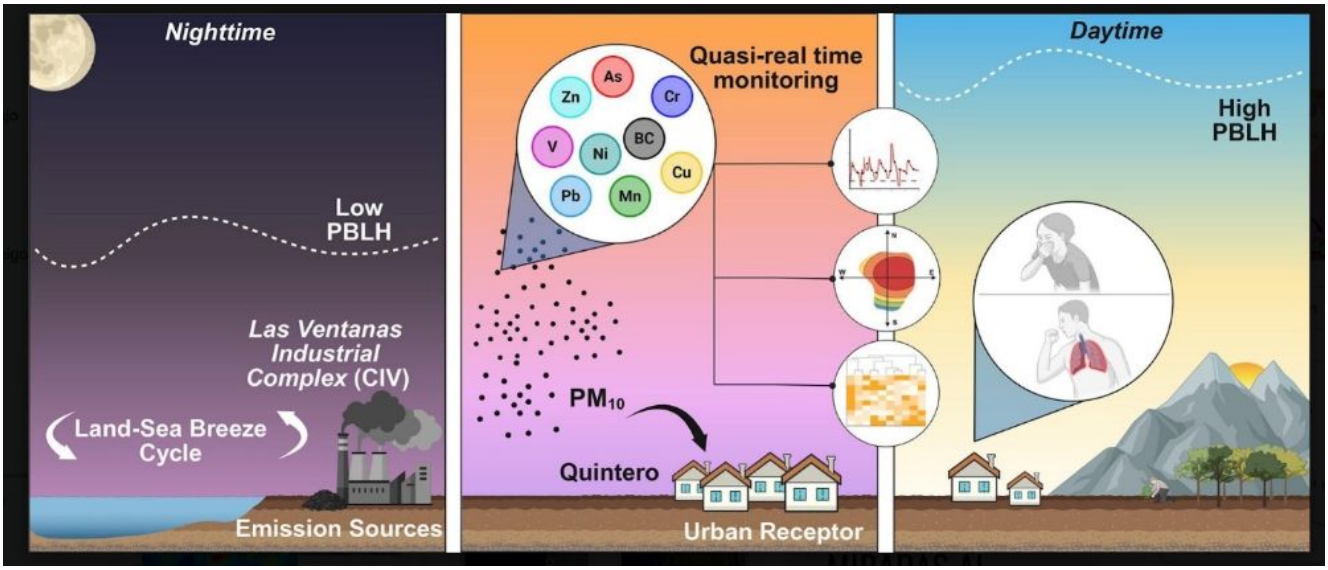
Quintero-Puchuncaví: estudios U. de Chile revelan elementos potencialmente tóxicos en el aire y en entornos escolares de la zona

Episodios de alta concentración de arsénico, plomo, cobre, zinc y otros elementos durante noches y madrugadas; crisis sanitarias que no logran explicarse completamente por los contaminantes que hoy se monitorean; y presencia de metales potencialmente tóxicos en entornos escolares, con indicadores preocupantes en localidades interiores. Estos son algunos de los hallazgos realizados por investigadores de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, quienes publicaron tres estudios sobre la contaminación atmosférica en la zona. Sus resultados identifican potenciales riesgos de salud pública y aportan evidencia para orientar medidas destinadas a prevenir futuras crisis.

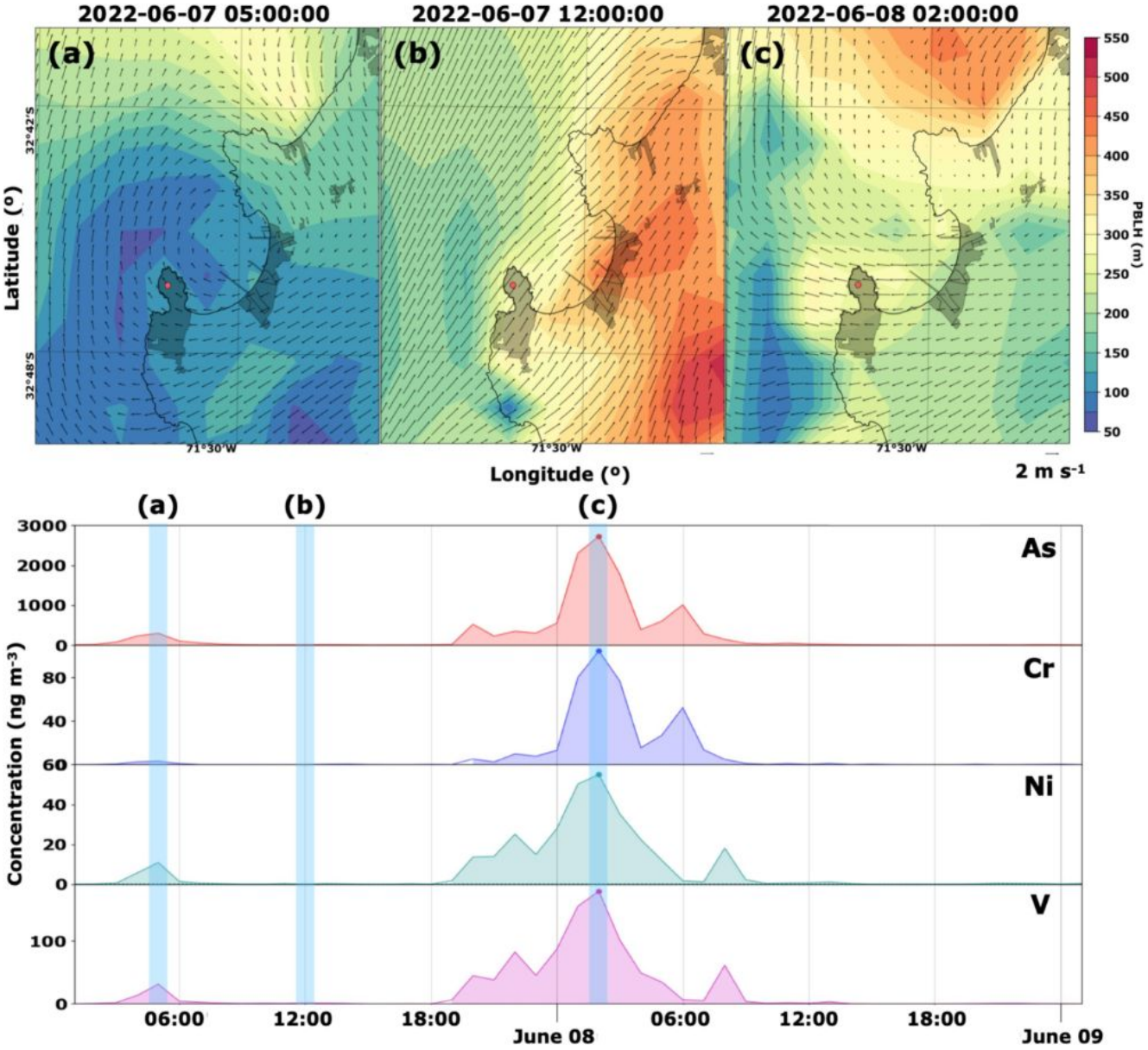


Una de las investigaciones analizó 12 años de información –entre 2010 y 2021– proveniente de 10 estaciones de la red oficial de monitoreo ambiental. Respecto a los resultados de este trabajo, el profesor Richard Toro destaca que “los registros ambientales analizados no bastan para explicar los eventos de síntomas agudos reportados por la población, como náuseas, mareos y dolores de cabeza”.

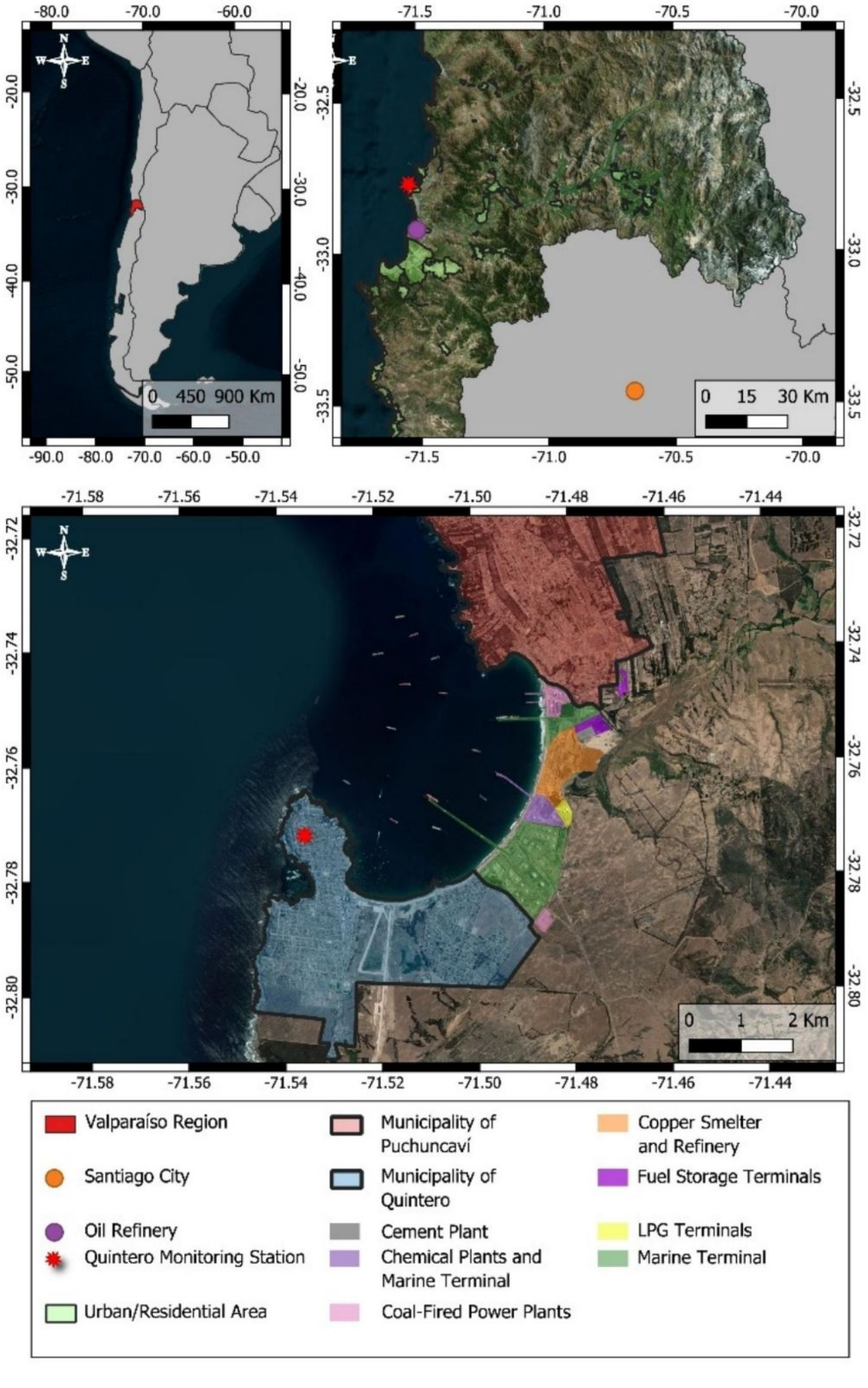


Otra investigación impulsada por el mismo equipo de la

Facultad de Ciencias de la U. de Chile detectó eventos de alta concentración de arsénico, plomo, cobre, zinc y otros elementos potencialmente tóxicos en el aire de la zona durante las noches y madrugadas.



Este trabajo permitió comprobar que los vientos nocturnos pueden transportar emisiones de las fuentes industriales presentes en este territorio hacia áreas pobladas, donde la baja ventilación favorece su acumulación.


-80.0
-70.0
-60.0
-20.0
-30.0
-40.0
-50.0
N
W
E
S
0 450 900 Km
-90.0
-80.0
-70.0
-60.0
-50.0
-71.5
-71.0
-70.5
-70.0
-32.5
-33.0
-33.5
0 15 30 Km
-71.58
-71.56
-71.54
-71.52
-71.50
-71.48
-71.46
-71.44
-32.72
-32.74
-32.76
-32.78
-32.80
0 1 2 Km
Valparaíso Region
Santiago City
Oil Refinery
Quintero Monitoring Station
Urban/Residential Area
Municipality of Puchuncaví
Municipality of Quintero
Cement Plant
Chemical Plants and Marine Terminal
Coal-Fired Power Plants
Copper Smelter and Refinery
Fuel Storage Terminals
LPG Terminals
Marine Terminal

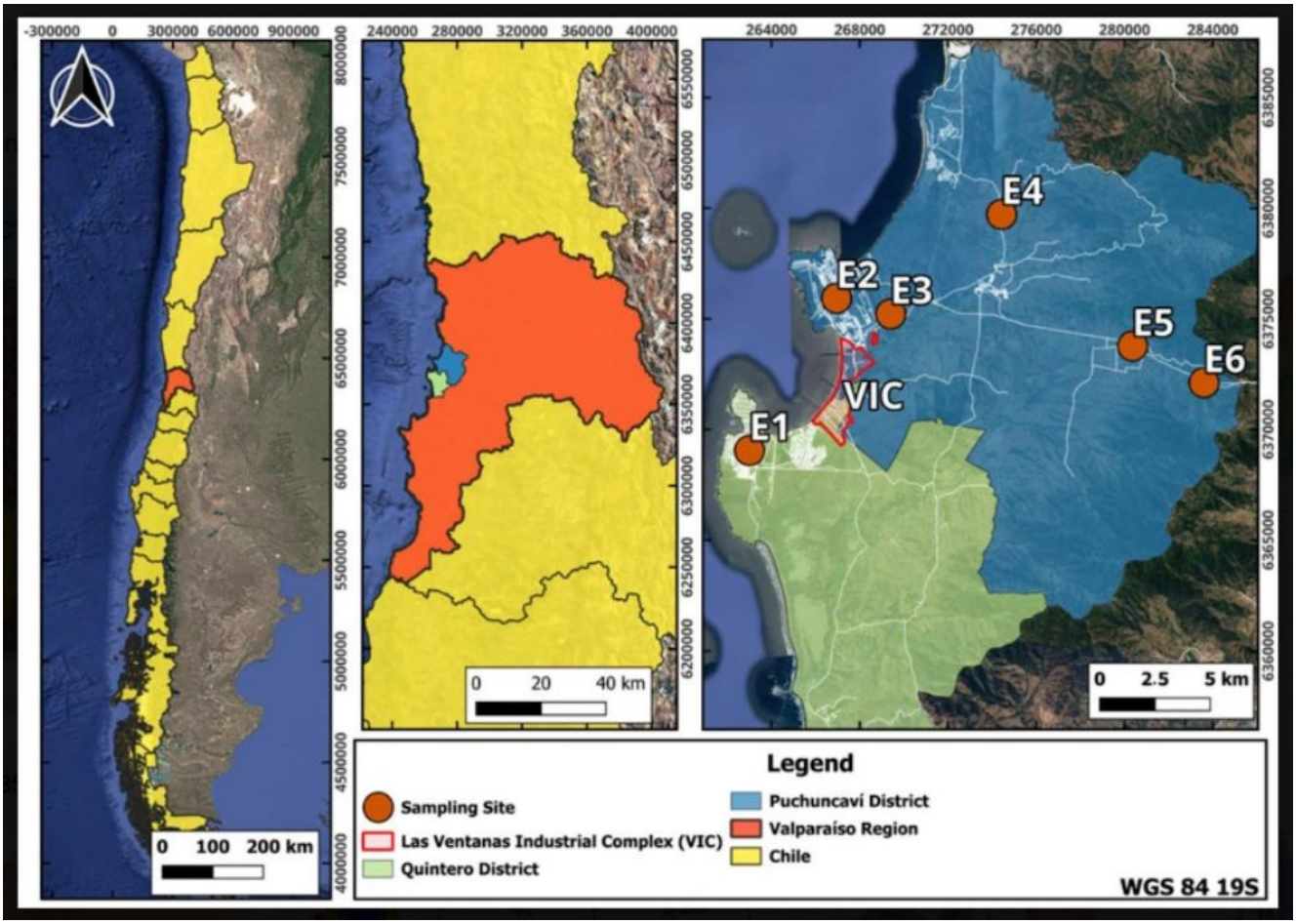
“Los resultados permiten orientar la investigación sanitaria hacia contaminantes, horarios y condiciones atmosféricas concretas”, destaca Richard Toro sobre los hallazgos asociados a este estudio.



Una tercera investigación de este equipo examinó la presencia de metales en seis escuelas de Quintero y Puchuncaví: República de Francia, La Chocota, La Greda, El Rungue, Pucalán y Los Maquis.



El estudio, cuyas campañas se desarrollaron durante julio y noviembre de 2023, detectó que el material depositado en los exteriores presentó un fuerte enriquecimiento de cadmio, cobre y plomo.



Identificó, además, que los mayores índices de riesgo por la presencia de metales tóxicos aparecieron en el material sedimentable y en el polvo interior de escuelas en Pucalán y Los Maquis, dos localidades interiores que no suelen ocupar el centro de la discusión sobre la contaminación industrial.



El equipo del Departamento de Química de Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile ha desarrollado distintas actividades de divulgación dirigidas a las comunidades de esta zona. En la foto, investigadores presentan resultados sobre los estudios en una escuela de Pucalán.



“En la zona, hay diez estaciones de monitoreo para una población relativamente pequeña. Una idea podría apuntar a medir en menos sitios, solo en aquellos más críticos y que están claramente identificados en la zona, pero medir más contaminantes, no solamente los regulados”, propone Richard Toro .

El pasado 17 de agosto de 2026, representantes de 1.034 vecinos y familias afectadas por los eventos de contaminación de Quintero y Puchuncaví llegaron hasta el Ministerio de Relaciones Exteriores para solicitar al Estado de Chile que se allane a una petición presentada por ellos ante la Comisión Interamericana de Derechos Humanos (CIDH). La acción incluyó una carta dirigida al canciller para avanzar en una mesa de conciliación y solución amistosa. Desde los múltiples eventos ambientales y sanitarios ocurridos en 2018, año en que se registraron las crisis ambientales y sanitarias de mayor connotación, 17 personas han fallecido esperando justicia y reparación, y persiste una pregunta científica decisiva para evitar que hechos similares vuelvan a ocurrir: **¿qué contaminantes alcanzan a la población y bajo qué condiciones atmosféricas se producen los eventos más graves?**

Parte de esa respuesta comienza a delinearse a partir de tres estudios desarrollados por investigadores del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. El equipo, que acumula cerca de 15 años estudiando la contaminación de Quintero y Puchuncaví, examinó las **limitaciones de la red convencional de monitoreo, las sustancias y condiciones meteorológicas que podrían intervenir en las crisis, los peaks horarios de elementos potencialmente tóxicos y su presencia en seis entornos escolares**. Los resultados, si bien no resuelven todavía el origen de los numerosos casos que la autoridad sanitaria calificó como compatibles con intoxicación ni atribuyen responsabilidades específicas, revelan “puntos ciegos” de los sistemas de monitoreo y muestran que una vigilancia de mayor resolución podría contribuir a anticipar y prevenir futuras emergencias.

El enigma de las intoxicaciones

El 14 de marzo de 2018, 291 niños, niñas y adolescentes resultaron afectados por un nuevo episodio de contaminación en Quintero y Puchuncaví. Aquel día, sin embargo, el máximo horario de dióxido de azufre (SO2) registrado por la red oficial llegó a 79 microgramos por metro cúbico, muy por debajo del límite horario chileno de 350. **Los principales contaminantes vigilados no parecían guardar relación suficiente con la magnitud de la emergencia**. Pero este no fue un caso aislado. El 25 de septiembre de ese mismo año, el registro acumulado ya superaba las mil personas atendidas por mareos, náuseas, vómitos, dolores de cabeza, desvanecimientos e irritaciones respiratorias. Las clases fueron suspendidas, los centros asistenciales recibieron a cientos de pacientes y volvió a instalarse una pregunta que todavía no tiene una respuesta definitiva: ¿qué estaban respirando los habitantes de Quintero y Puchuncaví?

Esa interrogante está en el centro de uno de los tres estudios desarrollados por el equipo del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. La investigación, publicada en la revista Urban Climate, analizó doce años de información —entre 2010 y 2021— proveniente de diez estaciones de la red oficial de monitoreo ambiental. El trabajo, encabezado por el académico y Doctor en Química **Richard Toro**, examinó las concentraciones de material particulado PM10 y PM2,5, SO2, monóxido de carbono, ozono y dióxido de nitrógeno. De este conjunto, el material particulado y el SO2 fueron identificados como los contaminantes regulados más críticos. Si bien los promedios anuales generalmente se mantuvieron bajo los límites de la normativa chilena, la comparación con las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) mostró una realidad distinta, ya que **algunas estaciones registraron más de 50 días al año sobre la recomendación diaria para PM2,5 y hasta 309 días sobre la recomendación para SO2**.

El profesor Toro explica que el hecho de que los registros superen las recomendaciones de la OMS o la norma chilena no significa automáticamente que una persona se vaya a enfermar, pero sí aumenta estadísticamente el riesgo por exposición a estos contaminantes. “Tenemos el caso del material particulado fino o PM2,5, por ejemplo, que puede penetrar más profundamente en el sistema respiratorio. En este caso, **la exposición a PM2,5 se asocia con inflamación, estrés oxidativo y agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Cuando esa exposición es de largo plazo podría ocasionar también algunos tipos de cáncer y mortalidad prematura. Otro contaminante muy importante en la zona es el dióxido de azufre**. Ahí, la exposición aguda a altas concentraciones también puede agravar problemas respiratorios, especialmente en personas susceptibles”, plantea.

El hallazgo más revelador, sin embargo, surgió del análisis de la correlación entre los distintos casos calificados como compatibles con intoxicación y el registro de contaminantes monitoreados, ya que en numerosos casos las concentraciones de PM10, PM2,5 y SO2 no superaron los límites establecidos o no alcanzaron niveles que permitieran explicar la gravedad y extensión de los síntomas presentados por la población. “**Los registros ambientales analizados no bastan para explicar los eventos de síntomas agudos reportados por la población, como náuseas, mareos y dolores de cabeza**. Esta limitación exige ampliar la investigación de contaminantes y vincular las mediciones con información clínica y de exposición para esclarecer las causas de estos episodios, sin descartar posibles contribuciones de los contaminantes ya monitoreados”, afirma el académico de la Universidad de Chile.

Los investigadores proponen dos hipótesis para abordar este vacío. La primera corresponde al trióxido de azufre (SO3), un gas que puede transformarse rápidamente en ácido sulfúrico y generar nieblas ácidas. La segunda apunta a compuestos orgánicos volátiles provenientes de instalaciones que refinan,

almacenan o transportan hidrocarburos y derivados del petróleo. También plantean que distintas sustancias podrían interactuar y provocar efectos mayores que los producidos individualmente. Richard Toro explica al respecto que las normas suelen evaluar cada contaminante por separado, pero las personas están expuestas a mezclas químicas que pueden reaccionar en la atmósfera y transformarse en nuevos compuestos. En esta línea, "**una de las conclusiones del estudio es que se instalen estaciones de monitoreo que no midan solamente contaminantes criterio, sino también otros contaminantes no regulados**. La instalación de un 'supersitio' de monitoreo permitiría establecer hipótesis mucho más certeras sobre las causas de estos eventos sanitarios masivos en la zona", señala.

Un visitante nocturno

La crisis de 2018 dejó instalada una pregunta que se repetiría en los años siguientes: ¿qué ocurre en la atmósfera de Quintero durante esos eventos breves en que distintas personas comienzan a sentirse mal casi simultáneamente? Las redes convencionales informaban las concentraciones de algunos contaminantes regulados, pero no conseguían identificar todos los compuestos presentes en la atmósfera, ni caracterizar hora por hora los elementos presentes en el material particulado. Frente a esta interrogante, **el mismo equipo de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile instaló en la estación de monitoreo de Quintero un instrumento capaz de analizar los elementos adheridos al material particulado respirable a cada hora**. La campaña, desarrollada durante junio y julio de 2022, permitió observar una dinámica hasta entonces escasamente documentada. El estudio, también publicado en la revista Urban Climate, integró información sobre el tamaño de las partículas, carbono negro, registros meteorológicos, análisis estadísticos de fuentes y simulaciones de la circulación atmosférica en la bahía de Quintero.

La investigación detectó eventos de alta concentración de

arsénico, plomo, cobre, zinc y otros elementos potencialmente tóxicos en el aire de la zona durante las noches y madrugadas. El trabajo determinó, asimismo, que los vientos nocturnos y la baja ventilación pueden transportar y atrapar emisiones de las fuentes industriales presentes en este territorio sobre áreas pobladas, un fenómeno que los promedios diarios no siempre consiguen revelar. Durante los meses de monitoreo, el arsénico llegó a alcanzar un máximo horario de 6.453 nanogramos por metro cúbico (ng/m³). También se registraron máximos de 8.003 ng/m³ de cobre, 7.854 de zinc y 2.719 de plomo. La enorme diferencia entre los valores habituales y los máximos, en este sentido, confirmó que la contaminación por metales no era constante y que podía variar drásticamente durante el transcurso de una jornada.

Uno de los eventos más críticos registrados ocurrió entre el 7 y el 8 de junio de 2022. Cerca del mediodía, cuando los vientos provenientes del océano mejoraron la ventilación, la concentración de arsénico registró menos de 10 ng/m³. A las dos de la madrugada, en cambio, aumentó hasta cerca de 2.800 ng/m³. Al mismo tiempo, el cromo superó los 100 ng/m³, el níquel los 50 y el vanadio se aproximó a 180. La secuencia permitió identificar que en las tardes la brisa marina favorece la dispersión y coincide con menores concentraciones de la mayoría de los metales, pero **en las noches y madrugadas la atmósfera se vuelve más estable y los vientos del noreste trasladan emisiones desde el complejo industrial a la estación de Quintero**. Este día, además, estuvo marcado por otro fenómeno. Mientras el flujo del noreste transportó las emisiones hacia Quintero, vientos del sur a lo largo de la costa formaron una barrera que dificultó su salida hacia el océano. De esta forma, en vez de dispersarse mar adentro, la simulación meteorológica mostró una configuración compatible con menor dispersión y acumulación cerca de la superficie.

Richard Toro explica que “al combinar las mediciones de metales con información meteorológica podemos identificar

aumentos de concentración asociados a determinadas direcciones del viento y evaluar su posible procedencia. Estos patrones aportan evidencia sobre el transporte de contaminantes hacia el sitio de monitoreo, aunque no permiten atribuir por sí solos cada evento a una fuente específica. **Los resultados permiten orientar la investigación sanitaria hacia contaminantes, horarios y condiciones atmosféricas concretas**. Demostrar que esas exposiciones causaron los síntomas exige vincular las mediciones ambientales con información sanitaria y de exposición de las personas afectadas". Detalla, por otra parte, que la permanencia y transporte de estos metales en la atmósfera tiene relación con el tamaño de las partículas en suspensión a las que se adhieren. "El tamaño de las partículas influye en dónde se depositan dentro del sistema respiratorio. Las partículas finas pueden alcanzar regiones más profundas, mientras que su composición y la forma química de los elementos también condicionan sus efectos. Algunas fracciones finas pueden permanecer más tiempo en suspensión y transportarse a mayores distancias", agrega.

El tamaño de las partículas también aportó información sobre la posible procedencia de estos contaminantes. **Cobre, zinc y arsénico se asociaron principalmente a partículas finas, un patrón compatible con procesos industriales de alta temperatura. Cromo, níquel y vanadio predominaron en una fracción intermedia relacionada con la combustión de carbón y otros combustibles**; mientras que las partículas más gruesas, vinculadas a la resuspensión del suelo, aumentaron principalmente en el día. El modelo, en definitiva, distinguió cinco factores: aerosol marino, polvo del suelo, combustión de carbón y dos factores industriales. Las categorías vinculadas a combustión de carbón y actividades industriales, específicamente, representaron alrededor del 13% del PM10 durante el día, pero su contribución aumentó hasta 29% en la noche. Los factores industriales, además, concentraron elementos de especial relevancia toxicológica. Uno de ellos estuvo caracterizado por cobre, molibdeno, plomo y zinc; y el

segundo, por arsénico, cromo y selenio.

Contaminación en entornos escolares

Los eventos masivos que han sido descritos como compatibles con intoxicación han sido la expresión más visible de la crisis ambiental que afecta a esta zona. Sin embargo, existe otra forma de exposición menos visible: aquella que ocurre cuando las partículas dejan de estar suspendidas en el aire, se depositan en suelos y superficies, y terminan ingresando -por ejemplo- a escuelas, espacios donde niños y niñas pasan una parte importante del día. En esta línea, un tercer estudio del mismo equipo examinó la **presencia de metales en seis escuelas de Quintero y Puchuncaví: República de Francia, La Chocota, La Greda, El Rungue, Pucalán y Los Maquis**. El trabajo, publicado en la revista Environments, analizó arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo y manganeso en tres tipos de muestras: suelo superficial, polvo acumulado dentro de salas y material particulado sedimentable en el exterior. También integró un modelo de riesgo para la salud humana utilizado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

La investigación, cuyas campañas se desarrollaron durante julio y noviembre de 2023, detectó que **el material depositado en los exteriores presentó un fuerte enriquecimiento de cadmio, cobre y plomo**. El cobre dominó el indicador de peligro no cancerígeno, mientras que níquel, arsénico y cromo concentraron las estimaciones de riesgo cancerígeno incremental. El polvo al interior de las escuelas, en tanto, presentó una carga intermedia de metales y características más parecidas a las partículas depositadas que al suelo. Para los investigadores, este patrón indica que **parte importante de la contaminación exterior ingresa y se acumula dentro de las salas**. En noviembre, además, la concentración promedio de cobre dentro del material sedimentado superó los 5.000 miligramos por kilogramo; la de cromo los 1.300; la de níquel los 1.000; y la de arsénico alcanzó 469. Estas cifras permiten

dimensionar la carga de metales que se deposita en los entornos escolares y que posteriormente puede entrar en contacto con estudiantes y trabajadores.

Por otra parte, **los índices de mayor riesgo por la presencia de metales tóxicos aparecieron en el material sedimentable y el polvo interior de escuelas en Pucalán y Los Maquis, dos localidades interiores que no suelen ocupar el centro de la discusión sobre la contaminación industrial de la zona**. "En el material sedimentable de la campaña de noviembre, Pucalán y Los Maquis presentaron los mayores indicadores de riesgo estimado entre las escuelas estudiadas. El resultado muestra que también necesitamos investigar los sectores interiores y que la cercanía al complejo industrial, por sí sola, no describe todos los patrones observados", comenta el profesor Toro, quien advierte que "esto nos obliga a evaluar y cuestionarnos cómo delimitamos la zona de influencia del complejo industrial, particularmente hacia el interior del valle de Puchuncaví".

Durante la primavera, **los índices acumulados calculados para las partículas depositadas fueron hasta diez veces superiores a los observados en las escuelas costeras**. Los investigadores plantean que esta situación puede explicarse por las condiciones secas que favorecen la resuspensión de elementos, mientras que la topografía de los valles interiores puede reducir la ventilación y facilitar la acumulación de partículas. Estos resultados, en consecuencia, sugieren que la delimitación de una zona afectada no debería depender únicamente de la cercanía con las industrias o del número de habitantes. La geografía, las rutas del viento, la época del año y los lugares donde finalmente se depositan los contaminantes también deberían ser considerados.

El académico de la Universidad de Chile y Doctor en Química destaca además que, "en la evaluación exploratoria, **níquel, arsénico y cromo fueron los principales contribuyentes al riesgo cancerígeno estimado bajo los supuestos utilizados**.

Para precisar ese resultado necesitamos conocer mejor sus formas químicas y la fracción que podría ingresar al organismo". Al respecto, indica que el país ha avanzado en normativas sobre arsénico y plomo, pero que es fundamental "ampliar la discusión sobre la vigilancia de otros elementos, como níquel y cromo, ya que para evaluar posibles medidas regulatorias necesitamos considerar sus formas químicas, las vías de exposición y la evidencia sanitaria disponible".

Por otra parte, comenta que "valdría la pena repetir el estudio y comprobar efectivamente qué concentraciones disminuyeron tras el cierre de la fundición de Codelco en Ventanas el año 2023, una fuente relevante. Pero no podemos perder de vista que también hay centrales termoeléctricas, otras industrias, cementeras, un puerto, actividad portuaria y tránsito de barcos, fuentes que también podrían estar inyectando estos metales a la atmósfera. Tampoco se puede olvidar que **hay décadas de contaminación acumulada en los suelos de la zona. Esa actividad industrial y todo ese polvo depositado en los suelos podrían generar también emisiones por resuspensión eólica**".

Monitoreo, prevención y remediación

Los tres estudios configuran una trayectoria que va desde la identificación de los "puntos ciegos" del sistema de monitoreo hasta la formulación de medidas preventivas. El primero demuestra que los registros analizados de PM10, PM2,5 y SO2 por sí solos no explican completamente la gravedad de los numerosos eventos compatibles con intoxicación. El segundo identifica metales, horarios, categorías de fuentes y condiciones meteorológicas asociadas a peaks breves. El tercero muestra que la contaminación no desaparece cuando las partículas dejan de estar suspendidas, sino que pueden depositarse, ingresar a las salas y permanecer en suelos y polvo. **La sistematización de evidencias, en este sentido, abre la posibilidad de pasar desde un modelo centrado en reaccionar ante la emergencia hacia otro capaz de anticiparla**.

Un primer paso en esta línea podría contemplar la reducción de "puntos ciegos" en el monitoreo. Junto con mantener la vigilancia de los contaminantes regulados, **los investigadores plantean la necesidad de medir con mayor resolución temporal algunos elementos potencialmente tóxicos adheridos al material particulado y desarrollar campañas dirigidas a sustancias que todavía están insuficientemente caracterizadas**, como el trióxido de azufre, las nieblas ácidas y los compuestos orgánicos volátiles. Una medición horaria o casi en tiempo real permitiría detectar aumentos breves que pueden diluirse al calcular promedios diarios, así como estudiar las mezclas de contaminantes a las que está expuesta la población. "En la zona, hay diez estaciones de monitoreo para una población relativamente pequeña. Una idea podría apuntar a medir en menos sitios, solo en aquellos más críticos y que están claramente identificados en la zona, pero medir más contaminantes, no solamente los regulados", propone el investigador de la U. de Chile.

La meteorología entrega otra capa de prevención a partir de variables pronosticables. Integrarlas a un sistema de alerta permitiría identificar con anticipación las noches y madrugadas en que existe mayor probabilidad de transporte de contaminantes hacia sectores poblados y activar medidas operacionales, fiscalización reforzada y comunicación de riesgo antes de que se produzcan las emergencias. Estas acciones también podrían diferenciarse en función de horarios y fuentes predominantes. Durante las noches y madrugadas de invierno, sugieren intensificar el control de emisiones industriales, así como verificar el funcionamiento de los sistemas de captura de partículas y metales. Durante el día, en cambio, adquiere mayor importancia reducir la resuspensión de polvo proveniente de caminos, patios industriales y operaciones de manejo de materiales. El objetivo no es paralizar toda actividad ante cualquier cambio meteorológico, sino contar con protocolos para aquellos períodos en que la atmósfera favorece la acumulación y el transporte hacia la

población.

La prevención, sin embargo, no termina cuando las partículas abandonan el aire. Los resultados obtenidos en las escuelas indican que el material contaminado puede depositarse en patios, techos y superficies, ingresar a las casas y permanecer disponible para una nueva resuspensión. En Pucalán y Los Maquis, donde se registraron los indicadores más elevados, resulta prioritario un seguimiento que combine mediciones de partículas en el aire, material sedimentable y polvo interior. Ambos casos, además, demuestran que la distancia respecto del complejo industrial o el tamaño de una localidad no basta para determinar su vulnerabilidad. **La topografía, las rutas del viento, la ventilación y los lugares donde finalmente se depositan las partículas también deben formar parte de las decisiones de política pública**. "Es necesario evaluar la exposición mediante estudios del polvo interior y en los espacios donde la gente desarrolla su vida cotidiana. También complementar las mediciones ambientales con estudios de exposición personal y, cuando corresponda, biomonitoreo. Algunos elementos pueden acumularse en el organismo o producir efectos asociados a exposiciones repetidas, pero ese comportamiento depende del elemento y de su forma química", agrega Richard Toro.

Los resultados, en este sentido, respaldan la **incorporación explícita de escuelas y otros espacios frecuentados por niños, niñas y adolescentes -como receptores sensibles- dentro de los planes de monitoreo, prevención, fiscalización y descontaminación**. Todo ello con el objetivo de reducir el ingreso de contaminantes a espacios habitados. La remediación requiere, asimismo, identificar los reservorios que mantienen en circulación la contaminación histórica. El cierre o la transformación de una fuente industrial como la fundición de Codelco en Ventanas puede reducir nuevas emisiones, pero no elimina automáticamente los metales acumulados por décadas en suelos y sedimentos. Por esta razón, los investigadores

plantean la necesidad de cartografiar sectores contaminados, determinar la composición, movilidad, biodisponibilidad y bioaccesibilidad de los elementos, y distinguir -mediante análisis de fuentes- cuánto corresponde a depósitos históricos y cuánto a aportes recientes. Esta información podría conducir a medidas específicas de limpieza, contención, cobertura, retiro o recuperación de suelos, según el riesgo y características de cada lugar.

Cristian Fuentes Valencia
Vicerrectoría de Extensión y Comunicaciones
Universidad de Chile