



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

Adaptación ambiental y salud pública post aluvión: Chañaral y Atacama

Proyecto Chañaral

DIAGNÓSTICO PRELIMINAR

**Adaptación
ambiental y salud
pública post aluvión:
Chañaral y Atacama**

Proyecto Chañaral

Índice	03	Presentación
	05	Introducción
	06	Diagnóstico físico del evento aluvional en Atacama de marzo de 2015
	14	Evaluación ambiental preliminar en áreas urbanas de Atacama
	26	Evidencia sobre exposición a metales y efectos en la población de Chañaral post aludes
36	Diagnóstico preliminar de contaminación marina en Chañaral y Pan de Azúcar	

Presentación

El mes de marzo de 2015, una parte importante de la Región de Atacama se vio afectada por un fenómeno hidrometeorológico que produjo aluviones, inundaciones, desborde de ríos, pérdidas materiales y lamentablemente el fallecimiento de 26 personas, y otras varias presuntas desgracias. Una de las zonas más afectadas por este fenómeno fueron las comunas de Chañaral y Copiapó.

El trabajo de años en pos de una vida digna; esfuerzos permanentes por sacar adelante a hijos y nietos; recuerdos irrecuperables de encuentros familiares, son todos parte de la pérdida de esta comunidad. Frente a la fortaleza y el empuje de los habitantes de una pequeña localidad y de sus autoridades por reemprender el camino de reconstrucción de sí mismos, de su espacio y de la comunidad, la universidad crea y asume el **Proyecto Chañaral UC**.

La Pontificia Universidad Católica de Chile, desde su misión fundacional, aspira a lograr la excelencia en la creación y transferencia del conocimiento y en la formación de personas al servicio de la Iglesia y la sociedad. En este sentido, la tragedia de los aluviones fue un detonante muy claro para convocar a nuestra vocación de compromiso público. Ya en el año 2010 un equipo de profesores, alumnos y administrativos participó en la reconstrucción de las localidades de Curepto, Hualañé, Licantén y Vichuquén, en la Región del Maule, devastada por el terremoto del 27F. En este proceso, la UC aprendió y se enriqueció como comunidad universitaria, tanto desde una perspectiva de investigación y aplicación de conocimientos adquiridos con fondos estatales y privados para el servicio de las personas, como desde su dimensión académica y humana al servicio de una realidad concreta.

El Proyecto Chañaral responde a un llamado de solidaridad y servicio de nuestra universidad, que se concreta en un proyecto en el que la comunidad UC se ha involucrado y comprometido con el país, sus personas, necesidades y sufrimientos. Este proyecto responde a dos objetivos estratégicos de la universidad, que son Compromiso Público e Interdisciplina para los grandes desafíos, ambos planteados en el Plan de Desarrollo 2015 - 2020. Nuestro compromiso es colaborar en la reconstrucción de la región por un período de dos años, en los cuales esperamos entregar a la comunidad las herramientas para que ellos continúen su proceso de planificación urbana y desarrollo a más largo plazo.

Esta iniciativa está conformada por varios equipos provenientes desde distintas facultades y centros de nuestra universidad. Cada uno de ellos tiene a su cargo un conjunto de estudios, propuestas y acciones que ponen su conocimiento al servicio de Chañaral y la Región de Atacama. Nuestro desafío es colaborar desde la universidad para que las comunidades afectadas puedan avanzar en definir su estrategia de desarrollo futuro.

El presente documento contiene los primeros resultados del Proyecto Chañaral UC. Esta publicación reúne estudios preliminares de cuatro ámbitos relevantes en temas ambientales, que permiten dar importantes luces sobre el nivel y consecuencias que el desastre tuvo, y por lo tanto, poder tomar los cursos de acción considerando estos antecedentes. Esperamos que este trabajo sea útil para las autoridades del sector público y privado, y la sociedad civil en general, en los próximos pasos que deberán seguir para levantarse en conjunto y proyectar esta zona en un nuevo escenario más preparado para eventuales contingencias.

Ignacio Sánchez Díaz
Rector

Noviembre, 2015

Introducción

El presente informe busca entregar los avances de cuatro investigaciones que académicos que forman parte del Proyecto Chañaral UC, están realizando en el marco del compromiso que ha adquirido la Pontificia Universidad Católica de Chile con la Región de Atacama, poniendo su conocimiento al servicio de la comunidad. El objetivo es entregar un diagnóstico preliminar de la adaptación ambiental y los efectos de salud pública que tuvo el aluvión de marzo de 2015 en Chañaral y otras localidades de la región.

En el primer estudio, el equipo del Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN) dirigido por el académico de la Facultad de Ingeniería Rodrigo Cienfuegos, realiza un diagnóstico físico del aluvión. Aquí se afirma que **este evento de precipitación se considera excepcional**, debido a la gran cantidad de agua precipitada y su inusual ocurrencia durante los meses de mayor temperatura. Esto último explica el alto flujo de agua y lodo observado en el cauce del río Salado, cuyas consecuencias fueron devastadoras en las localidades de Diego de Almagro, El Salado y Chañaral. La poca preparación, la intermitencia de estos eventos y los efectos del aluvión en la conectividad de los centros urbanos, dificultaron la acción de los organismos de emergencia y muestran la necesidad de un estudio y monitoreo exhaustivo de las distintas cuencas de la región y del país.

Luego, el equipo del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), liderado por el investigador principal de la línea de Recursos Críticos Pablo Pastén, señala que los resultados preliminares muestran que **los lodos en zonas afectadas por el aluvión en Copiapó y Chañaral, presentaron concentraciones bajo los niveles de intervención definidos para mediano plazo, salvo para cobre en Chañaral**. Según estos resultados y las recomendaciones de la autoridad sanitaria, los sitios que presentan concentraciones sobre estos valores deben ser priorizados para estudios adicionales y las labores de limpieza si fuese pertinente por su potencial peligro para la salud de la población en un plazo ojalá menor a un año. Sin embargo, **algunas muestras de polvo y suelos tanto de zonas afectadas como no afectadas por el aluvión, presentan concentraciones de arsénico, cobre, mercurio, plomo y zinc sobre los valores de referencia internacionales de largo plazo**, por lo que se recomienda realizar estudios confirmatorios y evaluación de riesgo por el potencial peligro para la salud de la población más vulnerable en el largo plazo. Cabe señalar que la geología del norte de Chile explica en muchos casos concentraciones de metales en suelos y sedimentos que naturalmente están por sobre valores de referencia internacionales. Por lo tanto, es importante avanzar en el desarrollo de normativa ambiental de calidad aplicable a Chile en suelos y sedimentos.

El tercer trabajo, por su parte, entrega evidencia sobre la exposición a metales y los efectos en la salud de la población de Chañaral. Este estudio, liderado por Sandra Cortés, investigadora del Departamento de Salud Pública de la Facultad de Medicina, da cuenta del seguimiento de un grupo de residentes de esta ciudad en varias etapas. En las primeras fases (2006-2012), se muestra la existencia de niveles elevados de metales en la orina de las personas y manifestaciones en la salud, especialmente con afecciones respiratorias. En 2015, tras los aludes, **los análisis de orina y polvo de las calles frente a las viviendas de un grupo de estos habitantes, mostraron niveles bajos de los metales evaluados**. Esto podría deberse a que los lodos conformados por la mezcla de residuos y aguas desde la cordillera, luego de depositarse sobre la ciudad, alcanzaron menores niveles de metales simulando un **efecto de lavado**. Estos resultados, no obstante, son preliminares y requieren de análisis más detallados, lo que se realizará durante los próximos meses.

Finalmente, la investigación liderada por el académico de la Facultad de Ciencias Biológicas Rodrigo De la Iglesia, muestra los avances de resultados de estudios de contaminación marina. De acuerdo a los análisis, realizados en abril pasado, **los niveles de cobre total disuelto en el agua de la caleta de Pan de Azúcar son bajos y similares a los registrados anteriormente, y no representan riesgo de toxicidad para los organismos marinos**. Sin embargo, el barro que desembocó por la quebrada estaba enriquecido con metales y al momento de entrar al mar, se produjo una aparente disolución de estos en el agua de mar, haciendo que las algas ubicadas en esta zona acumularan cobre. Sin embargo, esta acumulación no se evidenció en organismos superiores. **En la bahía de Chañaral, por su parte, los niveles de cobre detectados son mayores a los reportados con anterioridad**.

Los resultados que se presentan en este informe constituyen un primer diagnóstico de lo ocurrido en Copiapó y Chañaral tras el aluvión, especialmente en sus suelos y aguas. Sin embargo, se trata de resultados preliminares, buscando ser un avance en la investigación en temáticas ambientales. Con todo, conforman una buena base para continuar avanzando en determinar los efectos de este evento, y especialmente, entregar un apoyo técnico en la toma de decisiones de políticas públicas, lo que redundará en una mejor calidad de vida para los habitantes de la región.

Diagnóstico físico del evento aluvional en Atacama de marzo 2015

Autores

Especialistas

- **Rodrigo Cienfuegos**, Investigador Principal, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Gabriel González**, Investigador Principal, CIGIDEN - Universidad Católica del Norte
- **Roberto Moris**, Investigador Principal, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Cristián Escauriaza**, Investigador Asociado, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Jorge Gironás**, Investigador Asociado, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Lina Castro**, Ingeniero de Proyectos, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Vicente Zuazo**, Ingeniero de Proyectos, CIGIDEN - Pontificia Universidad Católica de Chile

Agradecimientos

- **Ian del Río**, Universidad Católica del Norte
- **María Teresa Jordán**, Cornell University
- **Emmanuel Mignot**, INSA Lyon
- **Sebastián Otarola**, Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Carlos Ovalle**, Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Rodrigo Riquelme**, Universidad Católica del Norte
- **Andrew Wilcox**, University of Montana

Introducción

La provincia de Chañaral tiene tres centros urbanos principales: Chañaral, Diego de Almagro y El Salado, que concentran más de 30 mil habitantes. El territorio es mayormente desértico y semi-desértico y presenta cuencas andinas de alta montaña, en donde se concentran típicamente las lluvias ocasionales. Los centros urbanos de la provincia de Chañaral se encuentran en la cuenca del Salado, la que colinda con el Salar de Atacama y se ubica en el desierto de Atacama, donde la media anual de precipitación es menor a 5 mm y es producida mayormente por lloviznas y nieblas costeras y, muy inusualmente, por eventos de precipitación. Si bien el norte del país está sujeto a un clima extremadamente árido, esta ocurrencia esporádica de tormentas fuertes y las características de las cuencas, las hacen susceptibles a eventos aluvionales, principalmente durante el verano local, los que han ocurrido cada cierto tiempo en la zona.

El evento de precipitación entre los días 24 y 27 de marzo de 2015, produjo fenómenos de crecida y aluviones de gran impacto en el norte de Chile, específicamente a lo largo de los ríos Salado y Copiapó, y en Taltal y Antofagasta. En la cuenca del Salado las localidades más afectadas fueron Chañaral, Diego de Almagro y El Salado; mientras que en la cuenca del Copiapó, las más golpeadas fueron Tierra Amarilla, Paipote y Copiapó. Hubo víctimas fatales, cientos de damnificados y aislados, y cuantiosos daños materiales.

El Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN), realizó extensas campañas en terreno y estudios exhaustivos para ejecutar un diagnóstico del fenómeno desde un punto de vista meteorológico y físico.

Contexto físico y meteorología

a) Análisis meteorológico

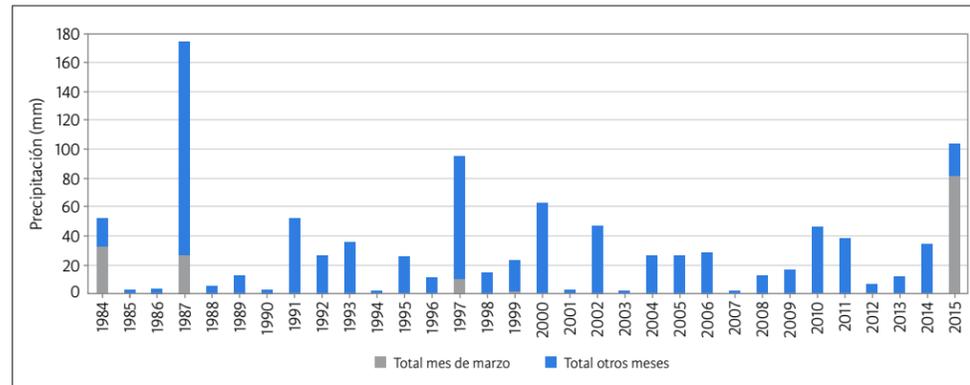
Las causas del inusual fenómeno han sido motivo de estudios exhaustivos y aún están sujetas a discusión por la comunidad científica. Las investigaciones apuntan a una inusitada debilidad del sistema de altas presiones llamada anticiclón semipermanente del Pacífico Sur, comúnmente presente sobre el norte del país. Esta condición permitió el acceso de un sistema de baja presión desde el suroeste hacia el desierto de Atacama, lo que dio origen a un núcleo frío en altura. Esto, en conjunto con la entrada de aire húmedo desde el noroeste (producto de anomalías en la temperatura del océano), indujo este evento de precipitaciones, el que fue concurrente con condiciones de temperaturas altas propias del verano en la zona. Lo anterior provocó que las precipitaciones líquidas afectaran zonas donde generalmente se observa precipitación nival. Durante el evento ocurrido los días 24 y 27 de marzo, cayeron 24 mm de lluvia sobre Antofagasta, 64 mm en la zona alta del valle del Copiapó y 26 mm en el sector de Mina Candelaria en Tierra Amarilla. A modo de comparación, la precipitación anual promedio en Caldera es de 18 mm, mientras que en las zonas en altura del río Copiapó es de aproximadamente 40 mm. Estimaciones aparte apuntan a un total de **80 mm de agua caída sobre la parte alta de la cuenca del río Salado.**

b) Excepcionalidad del evento

Para entender las características del evento y su excepcionalidad, es necesario contrastar sus propiedades (agua caída y los tiempos involucrados) con los valores máximos esperables de la región de Atacama para distintas duraciones y periodos de retorno —esto es, la frecuencia con que se observan dichas cantidades de agua caída—. La precipitación acumulada máxima del evento fue de 64 mm, medida en la estación de Pastillo de la Dirección General de Aguas (DGA) —ubicada en la parte alta de la cuenca del Río Copiapó, a 1.300 msnm— fue contrastada con los registros históricos de la estación de la DGA Iglesia Colorada, cercana al punto de medición, a una elevación de 1.500 msnm. El análisis muestra que **en las tres horas consecutivas más lluviosas este evento superó lo observado en promedio cada 30 años. Las 36 horas más lluviosas superan lo observado en promedio cada 50 años.** Los registros también muestran que no existen periodos de tormenta de más

de tres días de duración, como sí ocurrió en esta ocasión dado que se observaron precipitaciones durante cuatro días seguidos. Es más, de acuerdo a la estación Las Vegas (DGA), en la parte alta de la cuenca del Río Salado, si bien existen años anteriores con igual o mayor cantidad de agua caída, la excepcionalidad del evento se debe en mayor medida a su ocurrencia durante el mes de marzo.

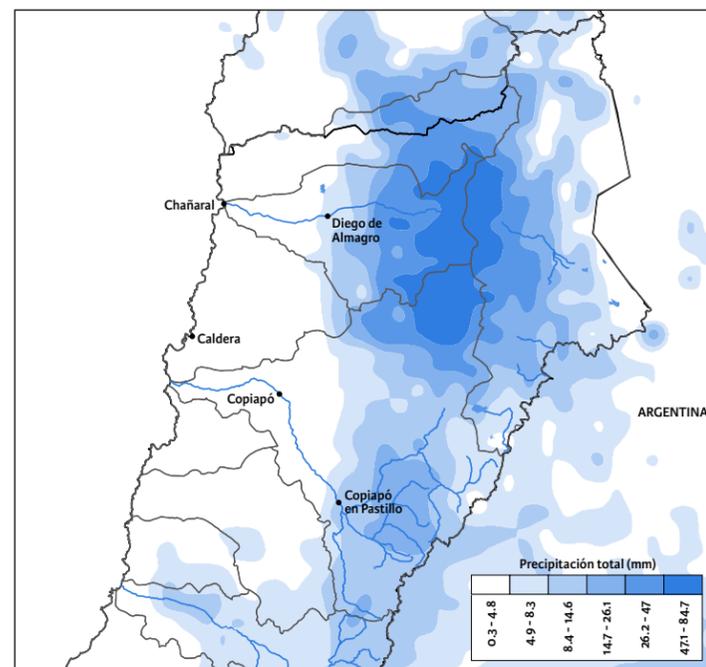
GRÁFICO 1. ESTACIÓN LAS VEGAS (DGA) - TOTAL DE PRECIPITACIÓN



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos históricos de la estación Las Vegas (DGA).

La magnitud y distribución observada de la precipitación se encuentra bien reproducida por el producto satelital *Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM* (IMERG), de la iniciativa *Global Precipitation*. Dicha imagen muestra la formación de un núcleo de altas precipitaciones sobre la precordillera y cordillera andina, y permite entonces estimar las precipitaciones en la cuenca del Salado, donde no existen suficientes registros de precipitaciones en superficie. La imagen refleja la formación de un núcleo importante y extenso de precipitación sobre la parte alta de la cuenca, estimándose en esta zona cerca de 80 mm durante todo el evento. La visita de terreno tras los aluviones confirma el análisis. No se observaron eventos aluvionales en la Cordillera de la Costa y en las inmediaciones de Diego de Almagro, lo que indica escasas precipitaciones en las zonas bajas del área afectada (es decir, en elevaciones menores a 1.000 msnm).

ILUSTRACIÓN 1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL AGUA PRECIPITADA.



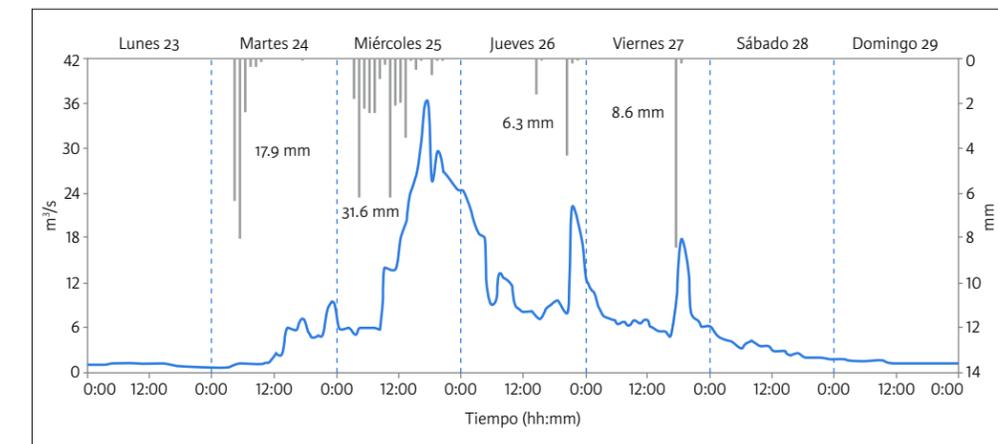
Fuente: Elaboración propia con datos satelitales IMERG.

c) Crecida y aluvión

El comportamiento de las crecidas y flujos aluvionales dependen de la ocurrencia de precipitaciones y su distribución temporal. Durante el evento que enfrentó la región de Atacama, ocurrieron 4 subeventos de precipitación. La estación Copiapó en Pastillo (DGA) registró los caudales producidos por el agua precipitada en la cuenca aportante, lo que permite tener una idea de la excepcionalidad de la crecida en el río Copiapó. Cabe destacar que estas mediciones tienen un cierto porcentaje de error asociado ya que las estaciones fluviométricas pueden fallar frente a grandes crecidas, más aún si la concentración de material sólido es importante. Finalmente puede ocurrir que parte del flujo se salga de la sección aforada por la estación, y por lo tanto, no sea medida por esta. Existe evidencia fotográfica posterior a la crecida de que esto efectivamente ocurrió.

El flujo medido refleja las respuestas a estos cuatro subeventos, observándose importantes diferencias entre ellas. El primero, pese a ser muy intenso durante 2 horas, produjo caudales pequeños dada las condiciones iniciales de sequedad del desierto de Atacama. Se humedeció el suelo, reduciendo la capacidad de la cuenca de absorber las precipitaciones posteriores. En la segunda parte, ocurrida desde la madrugada del miércoles 25 hasta la noche del mismo día, precipitó la mayor cantidad de agua y como el suelo ya estaba húmedo, produjeron caudales mucho mayores en el río. Finalmente, entre el jueves 26 y viernes 27 de marzo, ocurrieron dos pulsos de precipitación de corta duración, pero bastante intensos, que originaron crecidas instantáneas significativas. De la misma manera en la cuenca del río Salado, esta distribución temporal de la tormenta (pulsos iniciales que saturan el suelo y posteriores pulsos intensos sobre suelo ya húmedo), explican los grandes deslizamientos de terreno en las partes altas y quebradas de la cuenca y los subsecuentes aluviones de la región.

GRÁFICO 2. PRECIPITACIÓN Y CAUDAL EN EL RÍO COPIAPÓ DURANTE EL EVENTO



Fuente: Elaboración propia sobre la base de datos de la estación Copiapó en Pastillo (DGA).

El análisis histórico de los caudales diarios máximos en la estación Pastillo, muestra que el caudal promedio de las 24 horas con mayor escurrimiento durante el evento fue entre 100 y 200 años de periodo de retorno. Es decir, en promedio una vez cada 100 años se observan flujos de esa magnitud o mayores. Esto también indica que los caudales observados son históricamente menos frecuentes que el evento de precipitación, producto de su singular ocurrencia durante los meses de alta temperatura de la región.

d) Antecedentes históricos

Los registros históricos también muestran un evento aluvional el 12 de febrero de 1972, producido por el llamado invierno altiplánico en el sector cordillerano del río Salado, moviéndose aguas abajo violentamente, y aislando los pueblos de Diego de Almagro y el Salado. En Chañaral, la entrada de barro a las casas alcanzó un metro y medio de altura. En general, existen también registros históricos anteriores y posteriores de fuertes tormentas, algunas de las cuales también generaron

eventos aluvionales locales. Así, si bien se cuenta con registros de eventos similares en el pasado, aquellos como el de marzo de 2015 pueden considerarse anómalos, particularmente porque ocurrió a fines del verano, cuando los caudales típicamente son muy bajos.

Desde 1938, cuando los tranques de relaves de Potrerillos (Andes Copper Mining Company) alcanzaron su capacidad máxima, se comenzó a vaciar el material al mar a través del cauce del río Salado, pasando por las localidades de Llanta, Diego de Almagro y El Salado antes de desembocar en la Bahía de Chañaral. En 1959 se agotó el yacimiento de Potrerillos y comenzó la explotación de El Salvador, continuando con la descarga de relaves al mar. Con la nacionalización del cobre, Salvador pasó a ser propiedad de Codelco y se continuó utilizando el mismo sistema de evacuación de relaves en la Bahía de Chañaral. En 1975, los reclamos de la comunidad y los perjuicios al puerto mecanizado de embarque de la Minera San Fe motivaron a la División Salvador a trasladar el vaciado de sus desechos 9 kilómetros al norte de Chañaral, en Caleta Palitos. Para estos efectos, el Ministerio de Obras Públicas dispuso el desvío del río Salado. La corriente de Humboldt y la dinámica costera propia de la zona provocaron que **el área marítima contaminada por relaves aumentase de 5 a 20 millas, extendiéndose incluso a la zona del Parque Nacional Pan de Azúcar**. La lenta acumulación de material generó playas de relaves de baja pendiente, característica que se puede observar actualmente en las zonas costeras cercanas a Chañaral. En contraste, fotografías de principios del siglo XX muestran playas naturales con forma de herradura, típica de zonas de desembocadura natural del río. La inspección post evento aguas arriba permitió reconocer la presencia de relaves, rellenos y desechos mineros que habrían rellenado, obstruido y cubierto parcialmente el cauce. Estos materiales fueron movilizados por el flujo e incrementaron la concentración de material del aluvión.

e) Efectos del aluvión

Los aluviones afectaron intensamente las áreas urbanas de las ciudades de Chañaral y Diego de Almagro, y en menor medida a Taltal. En esta última, se pudo observar que las piscinas de retención ayudaron a contener parte de la carga de sedimentos de los aluviones. Las áreas afectadas fueron principalmente las aledañas a los cauces e incluso, urbanizaciones dentro de los cauces. Este patrón de emplazamiento está reconocido por los instrumentos de planificación territorial, no indicándose las áreas afectadas como zonas de riesgo. Sin embargo, la observación en terreno permitió determinar con claridad que varios sectores urbanos se ubican en zonas de cuenca o en cercanías de antiguos bordes costeros. Estos emplazamientos urbanos consideraban no solamente áreas residenciales e industriales, sino también infraestructura básica como edificios municipales y terminales de transporte público, altamente considerados y demandados por la población. Esto, además del efecto sobre la conectividad principal de las ciudades de la cuenca, si bien existen rutas alternativas y se dispuso de *bypass* transitorios, tuvo un efecto muy importante para la respuesta de emergencia.

Las características de los impactos de las áreas urbanas permiten estimar un volumen de agua y sedimentos extremadamente altos que superarían los 100 m³/s en Chañaral. Los resultados de modelaciones más sofisticadas del proceso aluvional se condicen con estos resultados.

f) Impactos específicos en Chañaral

El flujo aluvional se concentró en el cauce principal del Río Salado. Se observó que aguas arriba de Chañaral (hacia el nudo vial de la ruta 5 que conecta con el camino a Diego de Almagro) **el flujo ocupó todo el ancho de la sección (210 m de ancho máximo), produciéndose la carga de sedimentos que fue movilizada aguas abajo**.

El sedimento aportado por el flujo aluvional hiperconcentrado consistió principalmente en **arena gruesa y grava**. Este tipo de depósito formó un relleno compacto de unos 2 metros de espesor que cubrió gran parte de la zona baja de Chañaral desde la estación Copec hacia aguas abajo. El paso sobrenivel ayudó a encauzar el flujo hacia el poniente, protegiendo de alguna manera el sector norte de la ciudad. Se observó que algunas viviendas se construyeron dentro del mismo

cauce, al menos 5 metros más abajo de su borde. El centro de Chañaral presentó alto nivel de destrucción con lodo, alcanzando una profundidad de al menos 2 metros. Se detectó la presencia de grandes piedras y rocas que podrían pertenecer a actividades económicas con pétreos en zonas cercanas a la ciudad.

La mayoría de las casas y edificaciones destruidas por el flujo aluvional se concentran en el cauce de la Quebrada del Salado y en la desembocadura del mismo, donde se formó un delta de grandes proporciones. Es relevante destacar las formas de erosión que se crearon en la línea de costa, las que consistieron en pequeñas cuencas erosivas de hasta 15 metros de profundidad, con paredes subverticales que cortaron la ruta 5. El mar actualmente ha penetrado en estas zonas y **la línea de costa avanzó al menos 700 metros tierra adentro**. Cabe mencionar que este proceso de salida del flujo aluvional y la formación del extenso delta de detritos y sedimentos se debe también a un proceso natural especialmente característico en la desembocadura de los ríos del desierto de Atacama. Las mareas juegan un rol muy importante en la morfología de las desembocaduras, donde el flujo y reflujo de corrientes de marea hacia el interior del estuario puede producir deposición de sedimentos. Este fue el caso de la desembocadura del cauce del río Salado en Chañaral, donde **la barrera de sedimentos depositados a lo largo del tiempo, en conjunto a la construcción de la ruta 5, dificultó la desembocadura de los flujos aluvionales y agravaron la inundación en la zona**.

g) Impactos en Diego de Almagro

El aluvión inundó la ciudad por distintos frentes, siendo el cauce sur el que generó mayor daño, creando zanjas de más de 3 metros en la zona urbana. La inspección aguas arriba permitió reconocer la presencia de relaves, rellenos y desechos mineros que habían rellenado, obstruido y cubierto parcialmente el cauce. Estos materiales fueron movilizados por el flujo e incrementaron la concentración del aluvión, el que, hacia el oriente, se observó a ambos lados de la carretera, identificándose puntos en que el flujo principal cambia de norte a sur.

En la zona urbana se identificó una obra de encauzamiento de unos 200 m de largo asociada al nuevo puente construido por vialidad que aunque resistió el flujo, su diseño proyectado lo hizo insuficiente para mitigar el impacto del aluvión. Los cruces de los cauces fueron sobrepasados por el flujo aluvional, al igual que las estructuras de drenaje, que fueron bloqueados principalmente con escombros.

El agua y el barro afectaron aproximadamente a un 50% del territorio urbano de Diego de Almagro, principalmente en las zonas aledañas al antiguo cauce. Se observaron depósitos de sedimentos entre 50 a 150 cm de profundidad. El Plan Regulador Comunal, vigente desde 2011, no presenta una definición de zonas de riesgo acorde a la realidad observada, por lo que se recomienda su actualización a partir de nuevos estudios que definan las zonas aptas para el desarrollo urbano. Esto debería implicar una modificación de las zonas de extensión urbana y vialidad, en especial la circunvalación proyectada. Asimismo, se requieren obras de encauzamiento de mayor capacidad en la zona urbana, diseñadas para crecidas de esta magnitud. El área al sur del cauce también fue afectada por la inundación.

Conclusiones y desafíos

Se puede concluir que la naturaleza excepcional del fenómeno meteorológico y aluvional, que afectó al norte de Chile en marzo del presente año, se condice con los graves efectos sobre la comunidad. No obstante su excepcionalidad, la zona ya ha sufrido eventos similares en el pasado. Tanto los análisis técnicos realizados como el estudio histórico, muestran que **existe una posibilidad real que estos graves eventos vuelvan a ocurrir**. Sin embargo **la planificación, gestión y ocupación del territorio significó grados de vulnerabilidad y exposición que contribuyeron a aumentar los impactos negativos**.

Del estudio del fenómeno físico se concluye lo siguiente:

- **El evento meteorológico puede considerarse excepcional.** La cantidad de agua caída lo clasifica en eventos que se observan, en promedio, una vez cada 50 años aproximadamente, sin considerar que su ocurrencia durante el mes de marzo lo hace aún más inusual. Asimismo, los caudales que se observaron también se consideran anómalos en la historia de la zona. Así y todo, su ocurrencia ha sido observada en el pasado.
- **La depositación de materiales y lodos propia de este tipo de fenómenos paralizó la ciudad,** afectando su normal funcionamiento y la conectividad de la región y dificultando el actuar de los organismos de emergencia.
- Se observaron **graves daños en la infraestructura** tanto en Diego de Almagro como en Chañaral, así como a lo largo del cauce. Distintas viviendas y terrenos dispuestos para otras actividades comerciales se encontraban emplazadas dentro de la zona de inundación propia del cauce.

La experiencia nacional e internacional nos entrega información valiosa respecto a la manera en que abordamos la emergencia y la posterior recuperación. Nuevamente nos vemos enfrentados a la posibilidad de repetir patrones de comportamiento cultural e institucional, o tomar caminos que den cuenta de estos aprendizajes. Pensando en esta última posibilidad parece prudente plantear las siguientes observaciones:

- Tanto en la región afectada como en el resto del país **es necesario contar con un mejor monitoreo de las variables relacionadas con los desastres hidrometeorológicos, en particular de precipitaciones, temperaturas y caudales.** Esta información es particularmente escasa en zonas altas (sobre 1.000 msnm) y generalmente se mide o se reporta a escalas temporales muy agregadas (días o semanas). Para la prevención y gestión de desastres esta información debiese ser medida y reportada cada 5, 10 o 60 minutos; más aún, se debiera contar con estos datos en tiempo real de manera de mejorar la gestión de alertas y emergencias.
- Al ser las crecidas eventos más bien locales detonados por una condición particular de temperaturas y precipitaciones de carácter más regional, **se hace necesario comenzar a desarrollar herramientas para estimar estos caudales y tiempos de ocurrencia de crecidas.** Es bastante inviable contar con registros de caudales en todas las quebradas y cauces, particularmente cuando tienen un régimen efímero, pero sí es posible tener información y pronósticos de precipitaciones y temperaturas.
- La notable excepcionalidad de los caudales en el río Salado se debe principalmente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones durante los meses de alta temperatura en la región. Por lo tanto, el diseño de obras de mitigación para este tipo de eventos debiese específicamente considerar la frecuencia del evento aluvional, contemplando la temperatura y la precipitación como forzantes.

Referencias

- Cienfuegos, R., Campino, J. R., Gironás, J., Almar, R., Villagrán, M. 2012. Desembocaduras y Lagunas Costeras en la Zona Central de Chile. En: Fariña, José Miguel y Camaño, Andrés, (eds.) Humedales Costeros: Aportes científicos a su gestión sustentable. Ediciones UC, Santiago, Chile, pp. 23-65. ISBN 978956141259-0.
- Hartley, A. J., Chong, G., Houston, J. & Mather, A. E. 2005. 150 million years of climatic stability: evidence from the Atacama Desert, northern Chile. *Journal of the Geological Society*, 162, 421-424.
- Sepúlveda, S. A., Rebolledo, S., Mcphee, J., Lara, M., Cartes, M., Rubio, E., Silva, D., Correia, N. & Vasquez, J. P. 2014. Catastrophic, rainfall-induced debris flows in Andean villages of Tarapaca, Atacama Desert, northern Chile. *Landslides*, 11, 481-491.
- Garreaud, R. D., Molina, A., Farías, M. 2010. Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292, 39-50.

Evaluación ambiental preliminar en áreas urbanas de Atacama¹

Autores

Especialistas

- **Carlos Bonilla**, especialista en suelos, Ingeniero Agrónomo, Ph.D. CEDEUS (Fondap 15110020), Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Marina Coquery**, especialista en analítica química, investigadora en Química Acuática, Ph.D. IRSTEA
- **Sandra Cortés**, especialista en riesgos para la salud asociados a la contaminación ambiental, Epidemióloga Ambiental, VD, Mg Sc, Dra. en Salud Pública. Centro Avanzado de Enfermedades Crónicas (ACCDIS), Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina.
- **Héctor Jorquera**, especialista contaminación atmosférica, Ingeniero Civil, Ph.D. CEDEUS (Fondap 15110020), Pontificia Universidad Católica de Chile
- **Pablo Pastén**, especialista en contaminación del agua, Ingeniero Civil, Ph.D. CEDEUS (Fondap 15110020), Pontificia Universidad Católica de Chile

Ingenieros de Proyecto

- **Athena Carkovic**, Ingeniero Civil, M.Sc. CEDEUS
- **Alejandra Vega**, Ingeniero Civil, Ph.D.©. CEDEUS

Alumnos Tesistas

- **Magdalena Calcagni**, Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. CEDEUS
- **Pablo Moya**, Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. CEDEUS

Introducción

La magnitud de los aluviones que afectaron Atacama, y las áreas en que se generó y fue arrastrado el material, creó una situación ambientalmente compleja. Tanto porque en los sectores afectados existían viviendas y se desarrollaban actividades de diverso tipo –industrial, comercial, minera, agrícola–, como también porque los materiales arrastrados por el aluvión podían estar enriquecidos con sustancias tóxicas de fuentes naturales y humanas.

Las áreas afectadas, además, tenían un nivel basal o previo de contaminación no caracterizado adecuadamente, sobre todo respecto a la calidad química de las matrices sólidas como suelos y polvos. En las áreas urbanas y periurbanas de las ciudades afectadas por los aludes en Atacama, se han dispuesto en el tiempo residuos mineros sin los estándares de seguridad exigidos actualmente. En la mayoría de los casos se desconoce cuantitativamente su impacto en la distribución de contaminantes y los riesgos que implican para la población.

Para contribuir a solucionar esta problemática, el grupo de Geoquímica Ambiental del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) inició un *screening* geoquímico en áreas urbanas de Atacama pocos días después de ocurridos los aluviones, con el **objetivo de identificar los contaminantes de interés, los rangos de concentraciones según matriz ambiental y su variabilidad.**

Este consistió en un trabajo exploratorio en terreno, diseño e implementación de un plan de muestreo, medición de parámetros ambientales *in-situ*; validación de técnicas analíticas, análisis físicos, químicos y biológicos de laboratorio, análisis de resultados y elaboración de un informe técnico. El tipo y cantidad de muestras fue definido considerando los antecedentes, recursos y hallazgos disponibles. Con todo, se trata de un estudio preliminar, y se requerirán nuevas campañas de muestreo y análisis para tener mayor información sobre las áreas más contaminadas, la identidad y distribución de los contaminantes, las características sanitarias de la población, y la relación entre las fuentes contaminantes y concentraciones observadas, entre otros.

Dada la naturaleza de los aluviones, este trabajo puso énfasis en caracterizar metales y metaloides tóxicos en las matrices sólidas (lodos, suelos y polvos). La pregunta clave fue si los lodos esparcidos por el aluvión tienen algún grado de enriquecimiento en metales y metaloides tóxicos, respecto a otras áreas no impactadas directamente por el aluvión.

Para efecto de comparación de las concentraciones medidas, se empleó la normativa chilena o valores de intervención definidos por el Ministerio de Salud o metodología ATSDR (Agencia de Sustancias Tóxica y Registro de Enfermedades, Agencia de Salud de los Estados Unidos) para plazo intermedio (14 a 365 días) y/o valores referenciales empleados en otros países, de acuerdo a la disponibilidad de la información.

Se realizaron dos campañas de terreno en abril de 2015: Copiapó y Paipote (8 al 10), y Chañaral, El Salado y Diego de Almagro (16 al 18). A esto se suma la campaña de caracterización ambiental en Copiapó y Paipote, realizada entre el 18 y 22 de noviembre de 2014, constituyendo una interesante base de comparación.

El trabajo fue realizado por el grupo de Geoquímica Ambiental del CEDEUS con el apoyo del laboratorio estatal francés LAMA (Laboratoire de Chimie des Milieux Aquatiques) perteneciente a IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'environnement et l'agriculture, previamente conocido como CEMAGREF). Cuenta con la colaboración y coordinación conjunta con el Ministerio de Medio Ambiente (MMA). También se recibió apoyo logístico de las municipalidades de las localidades muestreadas (monitores de aire) y de la organización Desafío Levantemos Chile en Chañaral.

Antecedentes relevantes del área impactada

Pasivos ambientales mineros en la zona urbana

Atacama es una de las regiones con mayor cantidad de desechos mineros del país, con un total de 164 depósitos de relave según el catastro de SERNAGEOMIN (2015)². La mayoría de ellos se encuentra en las comunas más afectadas por el aluvión: Tierra Amarilla, Chañaral, Diego de Almagro y Copiapó; en esta última hay un total de 84 depósitos.

La coexistencia de estos relaves con áreas residenciales y de otros usos urbanos se explica por una pla-

nificación inadecuada o inexistente, generando potenciales riesgos en la salud de la población; a esto se suman potenciales fuentes de contaminación, como las emisiones atmosféricas de la fundición de cobre Hernán Videla Lira, en Paipote.

Debido a la creciente preocupación por los relaves abandonados (pasivos ambientales), el MMA realizó un estudio que definió sitios con potencial presencia de contaminantes metálicos en Copiapó y Tierra Amarilla, estableciendo una priorización para continuar con el estudio de evaluación de riesgos³. Aunque este estudio presenta una caracterización inicial de residuos mineros y propone algunos valores de *background* natural⁴, todavía falta contar con toda la información necesaria para realizar una gestión adecuada del problema.

El principal antecedente disponible para contrastar las mediciones post desastre, es la investigación realizada por el grupo de Geoquímica Ambiental del CEDEUS en noviembre de 2014 en Copiapó, mediante una campaña de muestreo de suelos, polvos, agua y material particulado respirable en la zona⁵.

Metodología

En las tres campañas realizadas el foco fue el muestreo de matrices sólidas: suelo, polvo de calle, lodo aluvional y relaves. También se tomaron muestras de agua natural y potable, y material particulado del aire. Se utilizaron metodologías estandarizadas: en el caso del suelo se trata de muestras superficiales compuestas (0-15 cm); y en las de lodo y relave, corresponden en su mayoría a muestras puntuales y superficiales (0-15 cm). Todas ellas se obtuvieron con palas o barreno (dispositivo especializado para la toma de muestreo de suelos). El polvo de calle se recogió a través del barrido de cerca de 1 m² de área. Para el material particulado (MP₁₀) se utilizaron equipos portátiles ubicados a un mínimo de 2 metros de altura sobre el suelo, utilizando filtros durante 24 horas. El muestreo de agua se realizó siguiendo protocolos estandarizados de acuerdo al tipo (natural o potable).

La campaña de Copiapó de 2014 buscó realizar un *screening* geoquímico, obteniéndose muestras de suelo de zonas agrícolas y plazas o terrenos baldíos de la ciudad. El muestreo de polvo de calle se planificó en base a una grilla de 1 km² y en áreas específicas como colegios, calles aledañas a plazas, entre otras. También se estudió un relave cercano a la población sin información previa de su composición.

Al año siguiente, el objetivo del estudio en la misma ciudad fue evaluar el estado ambiental tras el desastre. A diferencia del año anterior, se planificó un muestreo por transectos perpendiculares al río Copiapó que atraviesan zonas tanto inundadas como no inundadas. Se visitaron varios relaves en el área de inundación urbana para constatar su estado, obteniéndose muestras en 8 de ellos.

La campaña de Chañaral, en tanto, también buscaba evaluar el estado del sector post aluviones, incluyendo algunas muestras exploratorias en El Salado y Diego de Almagro. El muestreo de matrices sólidas también se planificó en transectos perpendiculares al Río Salado y las muestras de relave se tomaron principalmente en la Bahía de Chañaral.

TABLA 1. RESUMEN DE NÚMERO DE MUESTRAS TOMADAS POR CAMPAÑA Y POR TIPO DE MUESTRA

Matriz	Tipo de muestra	N° de muestras por campaña		
		Copiapó noviembre 2014	Copiapó abril 2015	Chañaral abril 2015
Sólida	Suelo	42	13	4
	Polvo calle	71	-	26
	Lodo	-	53	31
	Relave	30	53	14
Aire	Lodo para análisis microbiológico	-	32	4
	MP ₁₀ ¹	3 (11)	5 (8)	4 (4)
Agua	Agua potable	1	-	5 ³
	Aguas servidas tratadas	3	-	-
	Aguas naturales ²	6	5 (6)	6 (4)

¹ Las muestras de MP₁₀ corresponden a los puntos de medición. Entre paréntesis aparece el número total de muestras tomadas.

² Los números entre paréntesis corresponden a las muestras de agua superficial que se sometieron a análisis microbiológico.

³ Se tomaron 5 puntos durante la campaña en Chañaral en distintas zonas, incluyendo Copiapó.

Las muestras fueron analizadas de acuerdo a protocolos estandarizados. Las muestras de matrices sólidas fueron secadas a 40 °C y tamizadas a 2 mm, para luego analizar su composición elemental. Además, se realizaron análisis secundarios descriptivos como medición de pH, materia orgánica y porcentaje de finos (< 53 µm), y de coliformes fecales en algunos lodos obtenidos luego de los aluviones—los que fueron estudiados en la Facultad de Agronomía UC—. En los análisis de composición elemental se utilizaron tres métodos distintos: p-XRF, ICP-MS e ICP-OES. Estos se describen en la tabla 2 con sus ventajas y desventajas, junto con los elementos reportados y validados para cada metodología y el número de muestras medidas con cada método.

Todas las muestras fueron examinadas mediante p-XRF; además, una selección de las dos campañas a Copiapó se midieron a través de ICP-MS y en todas las muestras recogidas en la campaña a Chañaral se utilizó ICP-OES (para validación de p-XRF y debido a los altos límites de cuantificación de este último). El uso de dos detectores distintos para mediciones de ICP se explica porque se utilizaron dos laboratorios. Para las muestras de Chañaral también se midió Hg, mediante espectrometría de absorción atómica con vapor frío.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRES MÉTODOS DE MEDICIÓN DE COMPOSICIÓN ELEMENTAL UTILIZADOS EN LAS MUESTRAS DE MATRICES SÓLIDAS

	Método medición composición elemental matrices sólidas		
	p-XRF ¹	ICP-MS ²	ICP-OES ³
Descripción	Técnica de espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X portátil.	Técnica en la que se genera ionización y atomización de los elementos en una muestra líquida. Se diferencian en el tipo de detector. ICP-MS determina la composición a través de la diferenciación de masas y cargas.	ICP-OES determina la composición a través de la cuantificación de la emisión de fotones.
Fase de medición	Sólida	Líquida	
Ventajas	- Análisis simultáneo de los elementos químicos - Portátil - Fácil de usar y de rápida medición - Requiere poca preparación de la muestra (secado y tamizado) - Bajos costos de operación - Menor costo de inversión - No destruye la muestra	- Análisis simultáneo de los elementos químicos - Alta precisión - Bajos límites de detección	
Desventajas	- Alta variabilidad por lo que se debe evaluar su precisión en diferentes matrices - Altos límites de cuantificación - Requiere validación	- Requiere digestión para medición de matrices sólidas - Destruye la muestra - Requiere personal capacitado - Altos costos de operación - Alto costo de inversión	
Elementos validados y reportados	As, Ca, Co, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn de forma cuantitativa. Al y Si de forma referencial para análisis comparativo.	As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn.	Ag, Al, As, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn.
Muestras medidas/ Total de muestras	Copiapó nov 2014	143/143	20/143
	Copiapó abr 2015	119/119	63/119
	Chañaral abr 2015	75/75	- 75/75

¹ Portable X-Ray Fluorescence o Fluorescencia de Rayos-X Portátil.

² Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry o espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.

³ Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry o espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente.

Como se puede ver en la tabla 2, hay elementos que se seleccionaron en base a su validación para el reporte de resultados. Esta se realizó con el fin de asegurar un cierto nivel de exactitud de los resultados, es decir, que en promedio la medición arroje un valor cercano al real, y de precisión, que la variabilidad de distintas mediciones no sea muy alta. La validación del equipo p-XRF se realizó en base a mediciones de materiales con concentraciones conocidas (materiales de referencia), repeticiones de muestras y comparación con los resultados de ICP. Las validaciones de los resultados de ICP-MS e ICP-OES se realizó con el análisis de blancos, repeticiones, soluciones control, repeticiones inter-laboratorios y materiales de referencia. La validación para p-XRF permitió además seleccionar un límite de cuantificación (L.Q.), que corresponde a una concentración bajo la cual los resultados presentan alta incertidumbre (>60%), por lo que aquellas menores al L.Q. no son confiables y se reportan como L.Q./2. Además, como se muestra en la tabla 2, los resultados para aluminio (Al) y silicio (Si) medidos con p-XRF sólo se utilizan de forma referencial, ya que no se pudo validar su exactitud; sin embargo, estos son relevantes ya que forman parte natural de este geomaterial.

Respecto a los análisis del material particulado del aire, se obtuvo la concentración de MP₁₀ en 24 horas y se analizó su composición elemental. Los filtros en los que se depositó el MP₁₀ del aire se masaron y pesaron en una microbalanza con resolución de 1 µg y el análisis de composición elemental se realizó mediante XRF (X-Ray Fluorescence) en el laboratorio Chester Labnet, en Estados Unidos.

En las muestras de agua se analizaron parámetros físicos, químicos y biológicos, alternando en las distintas campañas. En general se realizaron análisis de metales disueltos, aniones y cationes, alcalinidad, sólidos suspendidos totales (SST) y demanda química de oxígeno (DQO). La medición de metales disueltos se hizo mediante ICP-OES, exceptuando el Hg disuelto que se midió a través de espectrometría de fluorescencia atómica con generación de vapor fría. En algunas muestras se analizaron pesticidas, parámetros microbiológicos y metales en los sólidos suspendidos a través de p-XRF, al igual que las muestras sólidas.

Resultados

Es preciso aclarar que, aunque en este informe no se incluyen resultados descriptivos de matrices sólidas (pH, materia orgánica, porcentaje de finos), todas las muestras de lodo presentaron valores de pH entre 6,6 y 8,9. Los resultados de análisis microbiológicos de 32 muestras de lodo recopiladas en Copiapó luego de los aluviones, mostraron concentraciones entre 0 y 22.000 NMP/g ST (número más probable de coliformes por gramo de sólidos totales). Se observó una distribución heterogénea de las concentraciones o alta variabilidad espacial, aunque los mayores valores se registraron próximos al lecho del río. La contaminación por coliformes fecales proviene probablemente del colapso del sistema de recolección de aguas servidas luego de las inundaciones. Además, las muestras de control medidas (suelo no inundado y relaves) no presentaron coliformes, de acuerdo a lo esperado.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (US EPA) determinó un valor máximo de coliformes de 1.000 NMP/g ST para la disposición segura y sin restricciones de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas servidas. Aunque no se trata del mismo tipo de lodos, se puede utilizar este valor como referencia. Se observó que cerca de un 40% de los lodos medidos superan este valor incluyendo muestras tomadas en el centro de la ciudad y en zonas residenciales. Esto implica que se deben tener ciertos cuidados en su disposición, como por ejemplo, restringir el acceso a público por un año o mantenerlos alejados de cursos de agua. Para las cuatro muestras recopiladas en **Chañaral** no se obtuvo presencia de coliformes fecales, sin embargo, el bajo número de muestras no permite descartar la presencia de coliformes en todas las áreas cubiertas por lodo.

Los resultados de composición elemental medidos con p-XRF de las muestras de lodo tomadas después de las inundaciones en **Copiapó**, se compararon con los resultados de las muestras de suelo de esa ciudad, obtenidas antes y después de las inundaciones. Se observaron diferencias estadísticamente significativas, según el test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha=5\%$), para aluminio (Al), calcio (Ca), cobalto (Co), cobre (Cu), hierro (Fe) y silicio (Si), siendo los promedios de los lodos mayores para todos los elementos, salvo para Ca. Sin embargo, otros elementos, como arsénico (As), plomo (Pb) y zinc (Zn) no presentaron diferencias significativas. La baja cantidad de muestras de suelo recopiladas en **Chañaral** después de los aluviones, no permitió establecer diferencias estadísticas entre las concentraciones de suelo y lodo. Sin embargo, al comparar los resultados (medidos con ICP-OES) de las muestras de polvo y lodo de **Chañaral**, se presentan diferencias estadísticamente significativas para aluminio (Al), arsénico (As), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), donde Al, As, Mn y Ni son en promedio mayores en las muestras de lodo. Cabe destacar que los

relaves en Copiapó y Chañaral, mostraron mayores concentraciones para casi todos los elementos, particularmente para Cu y Fe. Es por esto, que **los relaves se consideran una importante fuente de contaminantes.**

Luego de conocer las concentraciones elementales para los distintos tipos de muestra, es importante evaluar si estas son realmente altas y si generan impactos negativos en la salud de la población. Para una evaluación preliminar **se compararon las concentraciones medidas con valores de referencia internacionales**, los que establecen concentraciones elementales máximas aceptables en el suelo dependiendo de su uso. A las muestras tomadas se les asignó un uso de acuerdo al plan regulador de Copiapó y a las observaciones en terreno.

Aunque en Chile no se han elaborado normas o valores de referencia para suelos, tras los eventos ocurridos en la región de Atacama, el Ministerio de Salud (MINSAL) en conjunto con el Centro de Información Toxicológica de la Pontificia Universidad Católica de Chile (CITUC), elaboraron una pauta de evaluación ambiental con valores de intervención para As, Pb, Zn, V, Sn, Cd y Cr⁶. Estos corresponden a límites de plazo intermedio, es decir, concentraciones aceptables a las que la población podría estar expuesta por un periodo menor a un año. Además, existen valores de referencia establecidos en el estudio de Polimetales en Arica⁷ para Pb y As basados en la revisión de valores guías internacionales. Estos valores de referencia se presentan en el anexo.

Se utilizaron los valores de referencia establecidos en Brasil y Canadá elaborados en base a la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, junto con los límites de intervención establecidos por MINSAL para lodos de plazo intermedio. Además, el valor referencial para Cu se estimó con el método ATSDR. Es importante destacar que como los límites internacionales fueron fijados para suelos, se comparan con los resultados de polvos de calle y lodos sólo a modo referencial.

En la tabla 3 se observa el número de muestras que sobrepasan los valores de referencia dependiendo del tipo y el valor de referencia utilizado para la comparación. Se presenta la comparación para As, Cu, Hg, Pb y Zn, ya que para los otros elementos medidos no se observaron muestras sobre los límites. No se presenta la comparación para los relaves ya que estos se consideran como singularidades y fuentes de contaminantes, por lo que la comparación con guías de referencia para suelo podría generar alarma y error en la interpretación.

TABLA 3. RESUMEN DE NÚMERO DE MUESTRAS QUE SOBREPASAN EL VALOR DE REFERENCIA (BRASIL Y CANADÁ) O LÍMITE DE INTERVENCIÓN (MINSAL) RELATIVO AL NÚMERO DE MUESTRAS TOTAL MEDIDAS POR P-XRF, ICP-MS O ICP-OES, DEPENDIENDO DEL ELEMENTO Y LA CAMPAÑA

Elemento y campaña	Tipo de muestra y guía para comparación							
	Suelo		Polvo		Lodo		Minsal o Guía ATSDR	
	Canadá	Brasil	Canadá	Brasil	Canadá	Brasil		
As	Copiapó-noviembre 2014 ¹	11/42	15/42*	1/71	10/71*	-	-	-
	Copiapó-abril 2015 ²	1/11	10/11	-	-	1/37	35/37	0/37
	Chañaral-abril 2015 ³	0/4	4/4	2/26	26/26	1/31	29/31	0/31
Cu	Copiapó-noviembre 2014 ¹	16/42	42/42	26/71	71/71	-	-	-
	Copiapó-abril 2015 ²	3/11	10/11	-	-	0/38	17/38	0/38**
	Chañaral-abril 2015 ¹	1/4	4/4	13/26	26/26	12/31	30/31	23/31**
Hg	Copiapó-noviembre 2014 ²	1/7	1/7	0/8	0/8	-	-	-
	Copiapó-abril 2015 ²	0/11	0/11	-	-	0/38	1/38	-
	Chañaral-abril 2015 ³	0/4	0/4	0/26	0/26	0/31	0/31	-
Pb	Copiapó-noviembre 2014 ¹	1/42	4/42	0/71	4/71	-	-	-
	Copiapó-abril 2015 ²	0/11	0/11	-	-	0/38	0/38	0/38
	Chañaral-abril 2015 ³	0/4	0/4	0/26	2/26	0/31	0/31	0/31
Zn	Copiapó-noviembre 2014 ¹	0/42	5/42	2/71	28/71	-	-	-
	Copiapó-abril 2015 ²	0/11	1/11	-	-	0/37	0/37	0/37
	Chañaral-abril 2015 ³	0/4	0/4	0/26	5/26	0/31	0/31	0/31

¹Medido por p-XRF; ²Medido por ICP-MS; ³Medido por ICP-OES.

*Para As, el valor guía de Canadá (12 mg/kg) es menor que el límite de cuantificación (L.Q.) determinado para p-XRF (36 mg/kg), por lo que para este elemento se indican las muestras sobre L.Q., indicando el número mínimo de excedencia.

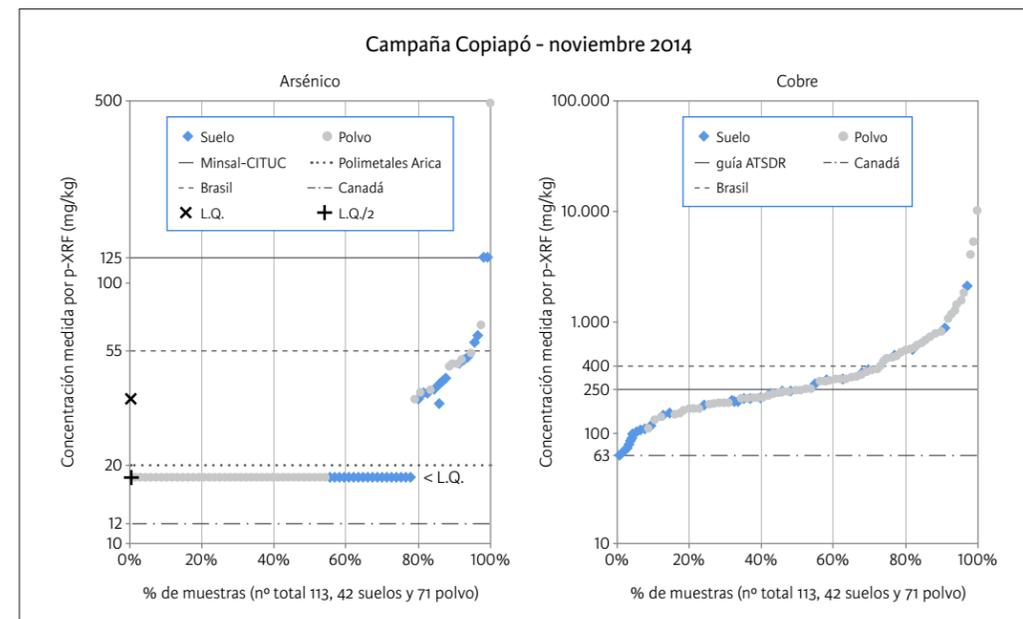
Notar que para las distintas campañas se usan diferentes métodos de análisis (p-XRF, ICP-MS, ICP-OES) seleccionados en función del número de muestras medidas y de la validación de este.

** El MINSAL no establece una guía para el Cu. El valor referencial de plazo intermedio para Cu se estimó con el método ATSDR.

Se puede observar en la tabla 3 que **un porcentaje importante de las muestras presentan altas concentraciones de As y Cu en relación al valor de referencia de Canadá, que es más restrictivo que el de Brasil. Además, la guía de plazo intermedio es solo superado para las mediciones de Cu registradas en la campaña de Chañaral.**

Para poder visualizar las concentraciones de las muestras sólidas y compararlas con los valores de referencia para suelos, se elaboraron figuras para As y Cu, que corresponden a los elementos en que el mayor número de muestras sobrepasan estos valores. Sin embargo, se incluyen solo las comparaciones con los valores de referencia para suelo de uso residencial de Canadá y Brasil, a diferencia de la tabla 3 en la que cada muestra se compara con el valor de referencia para su uso según la clasificación asignada a la muestra (residencial, agrícola e industrial). Además, se compara con el valor de intervención e plazo intermedio y en el caso de As, se incluye el valor establecido en el estudio de polimetales en Arica (valores nacionales).

FIGURA 1. CONCENTRACIONES DE AS Y CU MEDIDAS MEDIANTE P-XRF DE LAS MUESTRAS DE COPIAPÓ, NOVIEMBRE 2014

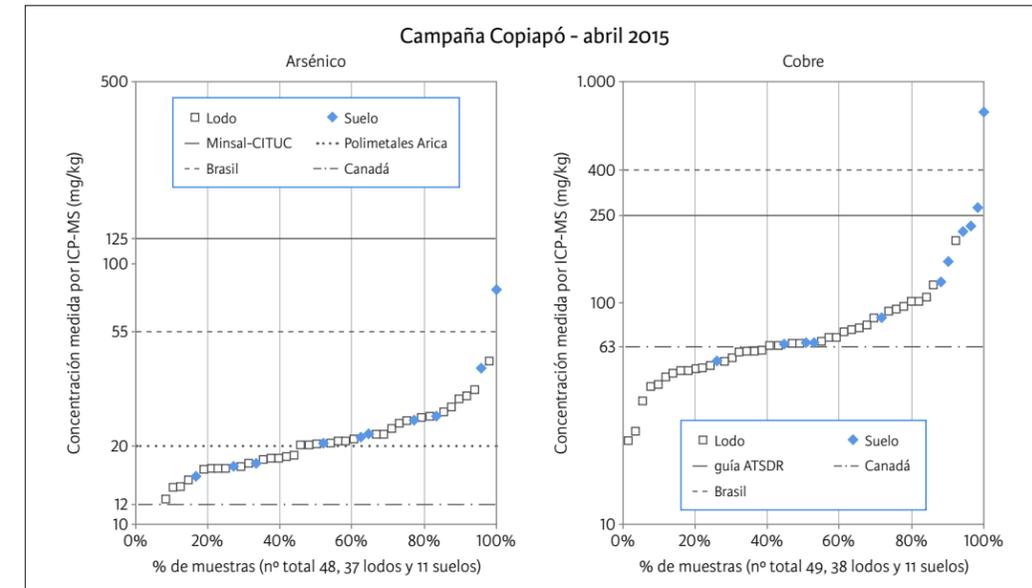


Los datos se ordenaron de menor a mayor para observar los porcentajes de muestras que se encuentran bajo distintos niveles de concentraciones.

En la figura 1 se presentan las concentraciones de las muestras de suelo y polvo tomadas en la campaña de Copiapó, en noviembre de 2014, medidas mediante p-XRF. Cabe destacar que para As, el límite de cuantificación es alto (36 mg/kg) por lo que las muestras bajo ese valor se presentan en L.Q./2, aunque no se conoce su concentración real. Se observa que **la mayoría de las muestras se encuentran bajo el límite de intervención del MINSAL para As (125 mg/kg), mientras que cerca del 50% de las muestras presenta concentraciones sobre la guía ATSDR para Cu (250 mg/kg).** Se debe hacer notar que los valores de intervención del MINSAL se generaron por el desastre y sirven para evaluar el riesgo en un plazo intermedio, por lo que en este caso se usa de manera referencial. Además, todas las muestras presentan concentraciones de Cu sobre el valor de referencia establecido en Canadá para suelos residenciales (63 mg/kg).

La figura 2 presenta el mismo tipo de gráficos para las muestras tomadas en Copiapó después del desastre. Se observa que **todas las muestras de lodo se encuentran bajo el límite de intervención de plazo intermedio para ambos elementos, aunque parte importante se encuentra sobre el valor de referencia definido en Canadá.** Se puede observar también que **cerca de un 60% de las muestras, incluyendo suelos y lodos, se encuentran sobre el valor de referencia de Canadá para Cu, porcentaje menor al observado previo al desastre.**

FIGURA 2. CONCENTRACIONES DE AS Y CU MEDIDAS MEDIANTE ICP-MS DE LAS MUESTRAS DE COPIAPÓ, ABRIL 2015

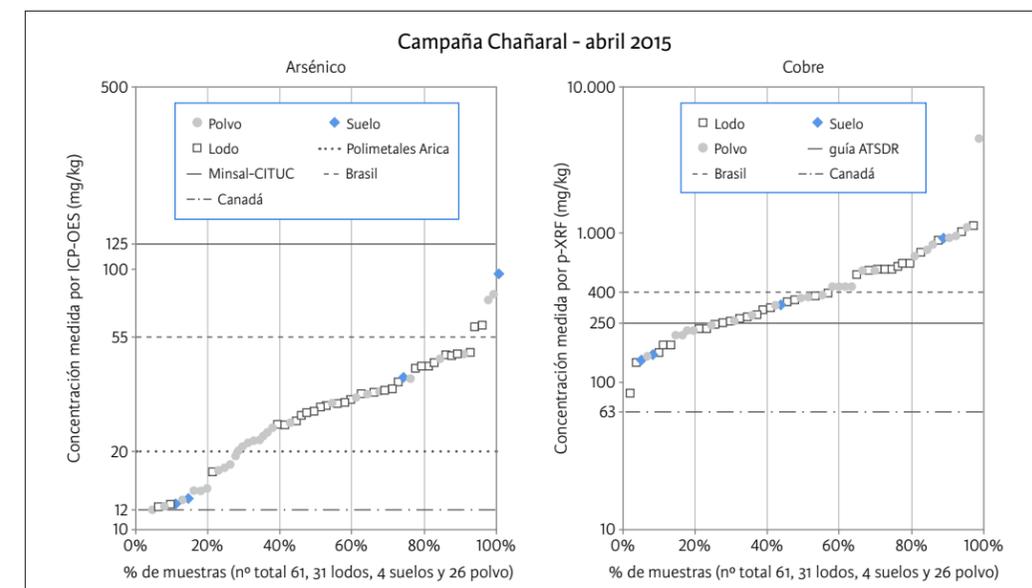


Los datos se ordenaron de menor a mayor para observar los porcentajes de muestras que se encuentran bajo distintos niveles de concentraciones.

En la figura 3 se presentan las concentraciones para las muestras de la campaña de Chañaral, abril 2015, incluyendo muestras de suelo, polvo y lodo. **Respecto a las concentraciones de As, todas las muestras se encuentran bajo el límite de intervención del MINSAL; mientras que para Cu el 74% se encuentra sobre la guía ATSDR. Para As y Cu, el 97% y 100% de las muestras, respectivamente, se encuentran sobre el valor de referencia definido en Canadá para uso de suelo residencial.**

Para determinar si las muestras sobre los valores de referencia afectan la salud de la población, es necesario realizar una evaluación de riesgo que determine claramente las rutas y vías de exposición, y que permita estimar la biodisponibilidad de los contaminantes para determinar si, en el caso de existir un receptor, este podría estar afectado.

FIGURA 3. CONCENTRACIONES DE AS (MEDIDAS MEDIANTE ICP-OES) Y DE CU (MEDIDAS MEDIANTE P-XRF) DE LAS MUESTRAS DE CHAÑARAL-ABRIL 2015



Los datos se ordenaron de menor a mayor para observar los porcentajes de muestras que se encuentran bajo distintos niveles de concentraciones.

Para las muestras de **material particulado y agua**, se presenta un resumen de los resultados, mientras que el detalle se encuentra en el informe técnico “Screening geoquímico en áreas urbanas de Atacama”. Respecto a las muestras de MP_{10} recopiladas, **ninguna sobrepasa el valor de la norma chilena** primaria de calidad del aire correspondiente a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como concentración de 24 horas. Sin embargo, **en Copiapó post desastre se observan valores más altos y con mayor dispersión** en comparación a la situación previa al desastre, **lo que se atribuye principalmente al levantamiento de polvo por la acción del tránsito de vehículos y trabajo de limpieza**.

La concentración elemental del material particulado en las muestras de la campaña de Copiapó, noviembre 2014, presentó **elevadas concentraciones de azufre, que podrían provenir de la fundición de cobre en forma de sulfatos, además de elevadas concentraciones de cloro (Cl)**. **En la campaña post desastre en Copiapó, se mantuvo la elevada concentración de azufre (S) y Cl, y además se observó un aumento de magnesio (Mg), aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca) y hierro (Fe) asociado a polvo en suspensión proveniente de los lodos depositados**. Para las mediciones post desastre en **Chañaral** se observó un **predominio de aerosol marino** —sodio (Na) y cloro (Cl)—, mientras que las muestras de **Diego de Almagro** presentaron **mayores concentraciones de Al-Si-Ca-Fe (polvo suspendido)**.

Respecto a las mediciones realizadas a muestras de agua y en conjunto con otras fuentes de información (Dirección General de Aguas, DGA), **en Copiapó las aguas superficiales, aunque escasas dentro de la ciudad, presentan altos niveles de sólidos disueltos, principalmente sulfatos, calcio, cloruro y sodio**. **Aguas abajo de la ciudad se observan mayores valores de conductividad eléctrica, cloruro, nitrato, sulfato, calcio, potasio y sodio**, en comparación con la información de aguas arriba, debido a la incorporación de aguas subterráneas y aguas servidas tratadas y a la disminución de caudal. Además, las aguas del río presentan bajas concentraciones disueltas de As, Fe, Cu, Cd, Zn, Hg y Pb, salvo para B que presenta valores sobre la norma de riego (NCh1333 1978 mod 1987).

Para las muestras superficiales tomadas luego del desastre, tanto en la cuenca del río Copiapó como en El Salado, se observaron valores muy altos de turbidez, sólidos suspendidos totales (SST) y una alta presencia de coliformes fecales, sobre todo para Copiapó. Por otro lado, la concentración y composición elemental de SST en las muestras tomadas luego del aluvión indica que ciertos elementos (As, Cu, Pb y Zn) se encuentran principalmente en forma sólida y no disuelta, dependiendo de la zona de muestreo, producto de la alta concentración de SST. **El agua superficial en Chañaral también presenta elevadas concentraciones de B y sales disueltas, principalmente cloruro y sodio**.

El agua potable en Copiapó antes del evento, en general no cumple la norma para este tipo de agua (NCh409/1 Of 2005) respecto a las concentraciones de sulfato, sólidos disueltos totales, nitrato y cloruro. En Chañaral no se cumple la norma respecto a nitrato, la razón nitritos y nitratos, sulfatos y sólidos disueltos. Por otro lado, en Diego de Almagro y El Salado sí se cumple la norma de agua potable⁸. Las mediciones realizadas permitieron determinar que la calidad del agua potable es similar antes y después del desastre, por lo que no conlleva un riesgo adicional. A la fecha el servicio ya debería estar normalizado, sin embargo, **la calidad normal del agua potable en la zona no es adecuada debido a la alta concentración de sales**, lo que provoca mal sabor y es un tema que debe ser solucionado con prontitud.

Conclusiones

Se observó que **existen elementos tóxicos en los suelos y polvos tanto de Copiapó como de Chañaral**, con concentraciones sobre valores de referencia internacionales, lo que **podría implicar un riesgo en el largo plazo para la salud de la población**. Sin embargo, **en Copiapó este estado se observó tanto antes como después de las inundaciones, descartándose en base a las mediciones que las concentraciones hayan sido causadas o acrecentadas por los aluviones**. En el caso de Chañaral no se cuenta con mediciones previas al desastre. Además, se observó una **alta heterogeneidad espacial en las concentraciones en matrices sólidas, lo que significa que hay zonas con altas concentraciones o hotspots y en otras son bajas**. Las zonas con concentraciones mayores a las recomendadas en otros países deben ser priorizadas para realizar una evaluación acabada de riesgo en la salud de la población y, en lo posible, estudios de exposición real a través de la medición de metales en orina y sangre.

Los relaves o pasivos ambientales ubicados dentro o cerca de las ciudades corresponden a fuentes de contaminantes con altas concentraciones de metales. Por otro lado, se observó que **los lodos muestreados luego del desastre no superan los límites de intervención de plazo intermedio** para la mayoría de los elementos estudiados, **excepto para cobre en Chañaral**. **En Copiapó, se observaron altos niveles de materia fecal**, tanto en aguas superficiales como en lodos en la ciudad, y un aumento en las concentraciones de material particulado respirable debido al polvo en suspensión.

Una conclusión general es que existe una alta complejidad en el sistema y una fuerte relación entre la cuenca y las ciudades o zonas urbanas que se emplazan dentro de ella. Es decir, en función de las inundaciones se observó que las distintas matrices ambientales están fuertemente relacionadas entre sí y a su vez están relacionadas con las ciudades. Por lo tanto, se concluye que no es suficiente evaluar cada componente del sistema por separado, debido a que se generan resultados parciales que no permiten desarrollar o proponer políticas públicas de calidad.

Se observó también que el sistema es dinámico. Es decir, que en la zona existen **amenazas permanentes, como la presencia de relaves o pasivos ambientales que se encuentran dentro o cerca de las ciudades; y otras transitorias o puntuales, como los lodos producidos por los flujos aluvionales**, debido a los cuales precisamente surgió la necesidad de una evaluación ambiental post catástrofe.

Debido a que se registraron concentraciones de elementos en matrices sólidas mayores a las recomendaciones internacionales en las zonas de estudio, se sugiere realizar un estudio acabado de riesgo tanto ambiental como a la población. Para ello se debería generar un muestreo con una mayor densidad de puntos en zonas urbanas y cercanas a fuentes de contaminación, de manera de representar adecuadamente la variabilidad o heterogeneidad espacial y temporal de las concentraciones. Además, dado que los relaves se identificaron como una fuente importante de contaminantes, en aquellos en los que se establezca un mayor riesgo se debería generar una progresión de medidas de contención, aislamiento y/o remediación. **A pesar de que los lodos no superan los límites de intervención de plazo intermedio para la mayoría de los elementos, salvo cobre en Chañaral, sí podrían representar un riesgo en el largo plazo. Considerando además el alto nivel de coliformes fecales que presentaron en Copiapó, se recomienda el retiro de los lodos junto con una disposición adecuada**.

Una de las principales rutas de exposición, que se cree domina en la zona de estudio, es la **resuspensión por la acción del viento de partículas provenientes de suelos, polvo de calles y relaves**. Además, **esta ruta se vio acrecentada por el polvo en suspensión proveniente del lodo seco en las ciudades**. Para abordar adecuadamente una evaluación de riesgo y contar con información sobre esta ruta, se recomienda realizar un monitoreo más exhaustivo del material particulado en el aire en un mayor número de puntos de medición y por un tiempo de monitoreo extendido. Este seguimiento permitiría generar un modelo de dispersión atmosférico para evaluar el comportamiento del material particulado, y determinar las rutas de exposición y zonas más afectadas.

Perspectivas

Para abordar las dificultades que se enfrentaron en este estudio —y que son válidas para otros eventos similares—, se sugiere en primer lugar, implementar políticas públicas para **generar planes de contingencia** frente a desastres que puedan involucrar daños químicos o geoquímicos, o en lugares en los que se identifiquen riesgos asociados a la exposición de contaminantes. Estos planes deben definir los criterios de las herramientas, métodos de medición y validación de datos utilizados en estos estudios, así como establecer adecuadamente las responsabilidades.

En general, se identificó la necesidad de **abordar el problema en forma integral** evaluando simultáneamente todas las matrices (agua, suelo, lodo y aire) así como las relaciones entre ellas, tanto en esta zona como en estudios de otras áreas. Además, es importante considerar la relación del sistema o la cuenca con las ciudades. Para entender estas relaciones es necesario contar con un conocimiento integrado de la cuenca en la que se emplazan las ciudades y sus habitantes.

Otro tema que debería ser abordado como política pública es el **establecimiento de normas o guías de referencia de calidad del suelo para diferentes usos que permitan discriminar si una muestra o un sector podría representar un riesgo a la población y el ambiente en el mediano o largo plazo**. Esto

permitiría evitar la incertidumbre en la interpretación de los resultados de concentraciones en el suelo y definir usos seguros para la población. Además, de modo de considerar la geología del país y evaluar si efectivamente las concentraciones de metales en suelos corresponden a un enriquecimiento antropogénico, se deben definir los niveles base o *background* en distintas zonas de Chile.

Los resultados de estudios de evaluación ambiental pueden ser utilizados para una mejor planificación territorial o determinación de usos de suelo, teniendo presente el efecto de la contaminación en la salud de las personas. Es decir, **se debería regular el uso de suelo considerando su calidad y/o contaminación, ya que hay riesgos asociados a la proximidad con relaves en zonas urbanas, a los lodos depositados en zonas agrícolas, entre otros.** Además, esto permitiría que la población cuente con una mayor educación ambiental. Tener información de calidad de suelo ayudaría a las personas y planificadores a tomar mejores decisiones, incorporando el factor del estado de la calidad ambiental del lugar en el que se emplacen o de las actividades que se permitan desarrollar en distintas zonas.

ANEXO: Símbolos y valores de referencia elementales

Símbolos de elementos

Elemento	Nombre	Elemento	Nombre	Elemento	Nombre	Elemento	Nombre
Ag	Plata	Cl	Cloro	Mg	Magnesio	S	Azufre
Al	Aluminio	Co	Cobalto	Mn	Manganeso	Si	Silicio
As	Arsénico	Cr	Cromo	Mo	Molibdeno	V	Vanadio
B	Boro	Cu	Cobre	Na	Sodio	Zn	Zinc
Ca	Calcio	Fe	Hierro	Ni	Níquel		
Cd	Cadmio	Hg	Mercurio	Pb	Plomo		

Valores de referencia elementales

TABLA 4. VALORES REFERENCIALES DE ELEMENTOS ESTABLECIDOS EN CANADÁ Y BRASIL PARA TRES USOS DE SUELO, VALORES DE INTERVENCIÓN DEFINIDOS POR EL MINSAL Y VALORES USADOS EN EL ESTUDIO DE POLIMETALES DE ARICA

Uso	Guía	Límites establecidos (mg/kg)				
		As*	Cu	Hg	Pb	Zn
Agrícola	Canadá	12	63	6,6	70	200
	Brasil	35	200	12	180	450
Residencial	Canadá	12	63	6,6	140	200
	Brasil	55	400	36	300	1.000
Industrial	Canadá	12	91	50	600	360
	Brasil	150	600	70	900	2.000
-	MINSAL	125	-	-	400	7.500
-	Estudio Polimetales Arica	20	-	-	400	-
	Estimación método ATSDR		250			

*Para As, valores guía de Canadá y valor de intervención de MINSAL se refieren a As inorgánico.

Referencias

- Este documento es la versión resumida del informe técnico "Screening geoquímico en áreas urbanas de Atacama: evaluación ambiental preliminar y perspectivas post aluviones de marzo de 2015" y su informe de difusión elaborado por CEDEUS, Hub UC con la colaboración de IRSTEA y DICTUC S.A. Para mayor detalle referirse al informe original.
- SERNAGEOMIN [Servicio Nacional de Geología y Minería] (2015). Catastro nacional de depósitos de relave: Depósitos activos y no activos 2015. Chile, 59 pp.
- Soublette, N., Heyer, J., Cortés, I. (2011). Informe final: Investigación preliminar y confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla. Elaborado por CENMA para el Ministerio del Medio Ambiente.
- El *background* natural corresponde a las concentraciones del suelo que ocurren naturalmente en la zona, permitiendo diferenciarlas de las influenciadas antropogénicamente.
- Los resultados de la investigación pre aluviones fueron presentados en la conferencia "Urban soils and metal contamination: issues and remedies" de la Society for Environmental Geochemistry and Health, del 30 de marzo al 1 de abril de 2015 en la Universidad de Texas, Arlington TX, EE.UU. Este trabajo se encuentra descrito en el artículo "Active and legacy mining in an arid urban environment: challenges and perspectives for Copiapó, Northern Chile" de Carkovic, Calcagni, Vega, Coquery, Moya, Bonilla y Pastén, enviado a la revista Environmental Geochemistry and Health, actualmente en proceso de revisión.
- Pauta de evaluación ambiental en lodo y suelo producto de aludes en II y III Región, 2015.
- SEREMI MINSAL [Secretaría Regional Ministerio de Salud] (2011). Reporte anual actividades 2011. Plan de Salud de polimetales SEREMI de salud de Arica y Parinacota.
- Datos SISS [Superintendencia de Servicios Sanitarios] 2014.

Evidencia sobre exposición a metales y efectos en la salud de la población de Chañaral post aludes

Autores

Especialistas

- **Sandra Cortés**, especialista en riesgos para la salud asociados a la contaminación ambiental, Epidemióloga Ambiental, VD, Mg Sc, Dra. en Salud Pública. Centro Avanzado de Enfermedades Crónicas (ACCDIS), Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina.
- **Alejandra Vives**, especialista en salud pública, epidemiología social y laboral, MD, MPH, PhD, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) y Centro Avanzado de Enfermedades Crónicas (ACCDIS), Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina.
- **Lucía Molina**, médico, especialista en Toxicología Ocupacional. Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina.

Asistente de Investigación

- **Rosario Toro**, Magíster en Epidemiología Ambiental. Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina.

Equipo de apoyo local

- **Héctor Adaros**, Tecnólogo Médico, Hospital de Chañaral, Región de Atacama.

Alumnos Pregrado

- **Cinthya Leiva**. Geografía UC.
- **Isabela Tapia**. Medicina UC.

Introducción

El norte de Chile se caracteriza por una intensa y permanente actividad minera, la que incluye asentamientos de cobre, oro y plata, entre otros. Dichas actividades generan emisiones de metales al ambiente, tales como arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), níquel (Ni) y cobre (Cu), dependiendo de las características geológicas de la zona en explotación. En el país se reportan un total de 603 relaves mineros al presente año 2015. De estos, solo 216 (35,8%) están asociados a empresas mineras en producción actual.

La gran mayoría corresponde a residuos abandonados (64,2%), los que representan un riesgo para la salud de las personas que viven en su cercanía. De ellos, el 81,1% se encuentra en el norte, entre las regiones de Arica y Atacama, siendo el más grande del país el relave ubicado en la costa de Chañaral¹. Dada su conformación química –silicio (Si), aluminio (Al), cobre (Cu), cromo (Cr), manganeso (Mn), plomo (Pb), zinc (Zn), mercurio (Hg), entre otros– y su cercanía con poblaciones humanas expuestas a través de las aguas superficiales o profundas, o polvos en suspensión, **el relave de Chañaral puede ser considerado como una importante fuente de contaminación por metales para las comunidades circundantes**, pudiendo tener importantes consecuencias para la salud de las personas, tales como **desórdenes del desarrollo neurológico, cáncer de pulmón y diversas afecciones respiratorias** de acuerdo a la literatura internacional².

La ciudad de Chañaral (13.527 habitantes de acuerdo al Censo de 2002) tiene una historia de más de cincuenta años de exposición a residuos provenientes de la actividad minera del cobre. Desde los inicios de las faenas de las mineras de El Salvador-Potrerrillos (en 1927), los principales desechos provenientes del proceso de extracción de cobre fueron descargados por el valle del Río Salado directamente al mar, frente a la Bahía de Chañaral. Desde 1975 a 1989, estos elementos fueron depositados en la costa a 15 km al norte de la Bahía de Chañaral; desde 1990 se acumulan en un tranque ubicado a 100 km de la ciudad³.

Este depósito de desechos mineros, de más de 220 megatoneladas, determinó un cambio geográfico en la Bahía de Chañaral, formando una playa artificial de más de 10 km de largo, con una profundidad estimada de 10 a 15 metros, y una superficie de más de 4 km², la que desplazó la línea costera original en cerca de 1 km, frente a la ciudad. La composición y química ambiental de los residuos ubicados aquí corresponden a mineral cuproso. Su estudio mostró un **fuerte enriquecimiento de cobre** en su superficie (niveles de 1.000 a 24.100 mg/Kg, respecto al promedio medido en la zona control del “Parque Pan de Azúcar”, con 34 mg/Kg. Otros metales detectados fueron **níquel** (concentraciones de 5 a 370 mg/Kg versus promedio 16 mg/Kg en Pan de Azúcar) y **arsénico** (30 a 281 mg/Kg comparados con <3 mg/Kg promedio en Pan de Azúcar) (Reimann y Caritat 1998, citado por Dold)⁴.

En 2006, Bernhard Dold determinó una zona de oxidación en el relave de Chañaral, la que permitiría la liberación de arsénico (As), molibdeno (Mo), cobre (Cu), zinc (Zn) y níquel (Ni) a las capas freáticas, o primera capa de agua subterránea (y la más susceptible de contaminación), y hacia el mar. Esta biodisponibilidad de los metales presentes en el relave, en conjunto con el transporte eólico, permite que la población de Chañaral estuviera expuesta por medio de la inhalación de material particulado respirable con cobre, níquel y zinc. De este modo, este autor concluyó que el relave era una fuente permanente de material particulado enriquecido con estos metales hacia la ciudad de Chañaral⁴.

El deterioro ambiental de la Bahía de Chañaral se acompaña de un **fuerte impacto en la flora y fauna de la zona**, los que muestran enriquecimiento con cobre⁵⁻⁷. En cuanto a las personas, el Servicio de Salud de Atacama (2001 a 2003) midió concentraciones de arsénico y plomo en orina y sangre, respectivamente, en 285 niños de Chañaral. Los niveles promedio de plomo en sangre fueron de 4,5 µg/dL (vs 3,0 µg/dL en Caldera) y los de arsénico inorgánico urinario mostraron un valor promedio de 17,23 µg/g de Creatinina (vs 13,96 µg/g de Creatinina en Caldera), **estableciéndose que estos metales no representaban un riesgo para la salud en este grupo**^{8,9}.

Sin embargo, la **preocupación** por los posibles efectos en la salud que pueda sufrir la población de Chañaral ha sido constante, motivando la generación de evidencia para cuantificar la exposición real de las personas, la ocurrencia de daño o no a la salud y su posterior cambio asociado a la ocurrencia de aludes en marzo de 2015.

A continuación se presentan los principales hallazgos de las investigaciones realizadas por el equipo de Epidemiología Ambiental del Departamento de Salud Pública de la Universidad Católica, liderado por la Dra. Sandra Cortés A.

Estudios realizados en el periodo 2006-2012

1) Determinación de la exposición a metales

Realizado entre los años 2006 y 2008, el objetivo de este estudio fue evaluar la exposición a metales urinarios en adultos residentes en la ciudad de Chañaral, con el fin de establecer su asociación con el depósito de residuos mineros.

a) Metodología

A partir de un universo de 8.851 personas entre 18 y 65 años residentes en la ciudad de Chañaral, se definió una muestra representativa de 190 adultos (70% de prevalencia estimada de sujetos que exceden una concentración determinada de cada metal en la orina, α de 5%). Se realizó un muestreo de tipo bietápico de manzanas y residencias, siguiendo la metodología validada por la OMS para encuestas poblacionales¹⁰.

Previo firma de consentimiento informado, se invitó a participar en el estudio a adultos entre 18 y 65 años de edad, con educación básica completa, sin deterioro mental, con autoreporte de no tener exposición ocupacional o accidental a sustancias químicas y con al menos tres años de residencia permanente en la ciudad.

Mediante el uso de cuestionarios validados se recolectaron antecedentes sobre edad, sexo, nivel educacional, lugar de residencia, historia laboral, actividades diarias, cercanía con potenciales fuentes de exposición a metales, tabaquismo pasivo y activo, consumo de alcohol, así como consumo de pescados y mariscos. A todos los participantes se les solicitó una única muestra de orina.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Estudios para el Desarrollo de la Química (CEPEDEQ) de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de Chile, mediante el método de ICP-MS, de alta precisión y capaz de hacer determinaciones múltiples y rápidas. Para establecer la concentración de mercurio se recurrió al Laboratorio del Ambiente de la Autoridad Sanitaria de la Región Metropolitana, donde se utilizó espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío. En aquellos casos en que los niveles de arsénico total fueron mayores a 50 $\mu\text{g/L}$ se envió un segundo frasco, no acidificado, para la determinación de arsénico inorgánico y sus metabolitos en el Instituto de Salud Pública (ISP); este último elemento se determinó por espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros. Todos los procedimientos utilizados representan tecnologías validadas internacionalmente y las mejores disponibles en Chile en ese momento.

Se entrevistó a 205 personas adultas residentes de la ciudad de Chañaral y de estos, 204 entregaron una muestra de orina para el análisis de metales. Se realizaron análisis descriptivos de los datos y estudios multivariados para identificar los factores más estrechamente asociados a la presencia de metales en orina.

b) Resultados

Las personas evaluadas tenían una edad de $43,6 \pm 11,3$ años (promedio \pm desviación estándar), siendo en su mayoría mujeres (67,3%), con predominio de personas con estudios básicos y medios (92,7%) y afiliadas a Fonasa (84,2%). El 39,5 % de la población refirió ser fumador actual. En relación a la actividad laboral, el 20% declaró tener contacto con agentes químicos en su trabajo y un 5,4% preparaban plomo artesanal para realizar actividades de buceo artesanal, tanto en el trabajo como en el hogar.

Al comparar los niveles de metales urinarios de la población de Chañaral con valores referenciales de metales en orina obtenidos en estudios internacionales, se observa que la mayoría de los metales urinarios de esta muestra exceden dichos niveles, especialmente para cobre y níquel (67,5% y 30,4% de los sujetos, respectivamente). A modo de comparación, los niveles

observados de níquel ($3,0 \pm 2,5 \mu\text{g/L}$) fueron similares a los medidos en niños de áreas expuestas a residuos de la industria del petróleo (*petcoke*) y los niveles de cobre ($20,2 \pm 11,5 \mu\text{g/L}$), mercurio ($2,2 \pm 2,3 \mu\text{g/L}$) y plomo ($2,1 \pm 7 \mu\text{g/L}$) excedieron los niveles observados en personas expuestas ambientalmente en otros países¹¹. Ver tabla 1.

Los análisis multivariados (datos no mostrados en este informe) revelaron que las personas que vivían más cerca del relave tenían más riesgo de tener niveles altos de cobre y níquel en su orina; por otra parte, se verificó que las personas que preparaban plomos para buceo artesanal tuvieron los niveles más altos de plomo, mientras que las que habían comido recientemente pescados tenían los niveles más altos de arsénico.

TABLA 1. CONCENTRACIÓN DE METALES EN ORINA ($\mu\text{g/L}$) DE HABITANTES DE CHAÑARAL, 2006

Medición	Cu	Hg	Ni	Pb	As Total	As Inorgánico
N° muestras	204	204	204	204	204	65
Mediana	17,9	1,6	2,8	0,9	44,6	17,0
Mínimo	2,2	0	0,55	0,4	3,8	3
Máximo	107,4	16	17,4	58	659,3	94
Percentil 95	41,9	6,3	7,2	4,5	233,2	63,2
Ref. internacional	13 ^b	4 ^b	4,1 ^b	2,6 ^b	93,8 ^a	35 ^b
Personas con niveles sobre la referencia (%)	67,5	13,2	30,4	9,3	13,7	16,9

^a Referencia calculada con datos nacionales. ^b Referencias de la literatura internacional.

Fuente: [11]

c) Conclusiones

En el año 2006, los habitantes adultos de Chañaral mostraron evidencia de exposición a los metales presentes en el relave conformado en la bahía. **Los niveles de metales urinarios medidos excedían los valores referenciales internacionales para poblaciones adultas en contacto involuntario con metales: cobre se excedió hasta en 3 veces, arsénico total se excedió en 2.5 veces más y níquel casi 1,8 veces; la exposición a estos tres elementos se vincula a daños respiratorios y hepáticos y cáncer**, según la literatura internacional.

2) Determinación del estado de salud en personas expuestas a metales

Tras el estudio de la exposición a metales se analizaron los efectos en la salud que estos podrían tener, considerando que todos los metales medidos tienen evidencia epidemiológica de daños clínicos o subclínicos en poblaciones expuestas. Entre los efectos se reportan **alteraciones reproductivas, cáncer en lugares anatómicos seleccionados, desórdenes de la función inmunológica, insuficiencia renal y hepática, enfermedades pulmonares y trastornos neurotóxicos**.

El objetivo de esta segunda investigación fue establecer la ocurrencia de daños a la salud de esta población con exposición comprobada a metales. Se priorizó la medición de alteraciones respiratorias, cambios en el perfil lipídico y alteraciones reproductivas, de acuerdo a la literatura internacional enfocada a la exposición crónica a arsénico, cobre y níquel, elementos presentes en el relave e identificados en la orina¹².

a) Metodología

Se trata de un estudio de corte transversal de la población de Chañaral entre 18 y 65 años de edad (marco muestral censo 2002). Se utilizó una muestra de conveniencia conformada por los participantes del estudio anterior sobre exposición a metales. Este análisis fue realizado entre los años 2010 y 2012. Se invitó a participar a quienes, habiendo formado parte de la investigación de 2006, hubieran mantenido su residencia en la ciudad durante los últimos cinco años y tuvieran disponibilidad para entregar una muestra de sangre, una segunda muestra de orina y responder a un cuestionario.

Se utilizaron los siguientes instrumentos¹³:

- Examen clínico: toma de presión arterial y medidas antropométricas (peso y talla).
- Perfil lipídico, transaminasas, proteinuria-hematuria-glucosuria-cetonuria-nitritos-leucocitos en muestra aislada de orina; proteína C reactiva. Para la interpretación de estos resultados se usaron los puntos de corte establecidos en la Encuesta Nacional de Salud 2009 (ENS 2009).
- Cuestionarios de salud: Se utilizaron cuestionarios validados en ENS 2009 sobre características socioeconómicas, dolor torácico (angina), estado nutricional, dieta, síntomas respiratorios crónicos, tabaquismo, consumo de alcohol, síntomas digestivos, autoreporte de enfermedades y medicamentos.

b) Resultados

La muestra, compuesta mayoritariamente por mujeres (67,7%) y personas afiliadas a Fonasa (85,9%), tenía una prevalencia de consumo de alcohol en el último año de 63,7% y de tabaquismo de 37,8%.

En la tabla 2 se encuentra el perfil de salud de las personas de la muestra, comparándolas con los valores obtenidos en la segunda encuesta nacional de salud de representatividad nacional.

TABLA 2. PERFIL DE SALUD DE ADULTOS HABITANTES EN CHAÑARAL (2006) Y EL PAÍS (ENS 2009-10)

Condición	Chañaral 2012	ENS 2009-10
Tos	18,4 (26)	8,1 (389)
Asma	27,0 (37)	10,1 (529)
Síndrome respiratorio obstructivo crónico	46,6 (48)	25,7 (1109)
Disnea	37,7 (61)	18,6 (938)
Colesterol > 200 mg/dl	64,4 (85)	35,6 (1215)
Triglicéridos > 150 mg/dl	51,5 (68)	35,2 (986)
Colesterol HDL < 40 mg/dl ó < 50 mg/dl (sexo)	69,5 (91)	47,3 (1325)
Algún hijo < 3000 g al nacer	38,1 (40)	34,1 (855)
Algún hijo prematuro	16,2 (17)	16,4 (410)
Algún aborto espontáneo	40,6 (43)	35,2 (881)
Antecedente de hígado graso	6,2 (10)	3,3 (163)
Antecedente enfermedad tiroidea	8,1 (13)	6,5 (323)
Antecedente de insuficiencia renal crónica	4,4 (7)	1,2 (61)
Hipertensión arterial	22,2 (30)	33,0 (1637)

Prevalencias % (número de personas evaluadas).

Dentro de los análisis realizados se exploró si la exposición a metales medida en el estudio previo se asociaba con estos hallazgos, lo que no pudo ser demostrado. Esto en parte se debe a que la exposición ha ocurrido de manera crónica y a niveles posiblemente bajos, determinando cambios en el perfil de daños de tipo inespecíficos y multifactoriales, tal como se evidencia en estos resultados. Se requieren análisis complementarios utilizando otros marcadores más específicos para el estudio de la exposición a metales y daños en salud, en los que se indague respecto a cambios en la capacidad de las personas para eliminar contaminantes de su organismo y en la variación de la excreción urinaria en este grupo. Estos estudios debieran considerar la comparación con otras ciudades que no tengan los niveles de metales en matrices ambientales como los observados en Chañaral.

c) Conclusiones

Respecto al estado de salud de los residentes expuestos a residuos mineros en Chañaral, **se evidencia una mayor sintomatología respiratoria que en el conjunto del país (ENS 2009), evidenciada por el autoreporte de tos, asma, disnea y síndrome respiratorio obstructivo.**

Los parámetros asociados a hipertensión y a las dislipidemias, como el colesterol total, colesterol HDL y triglicéridos, también se encontraron alterados en la muestra estudiada, dando como resultado prevalencias más altas de dichos problemas que a nivel del conjunto del país.

El análisis multivariado de los efectos como **asma, SRO, colesterol y triglicéridos elevados e insuficiencia renal crónica, mostró que entre los residentes de Chañaral la probabilidad de dichas enfermedades es más elevada**, aún habiendo ajustado por sexo, edad, hábito tabáquico, y consumo de alcohol para los dos últimos. Estos hallazgos muestran que esta muestra de voluntarios expuestos a metales propios del relave ha desarrollado un perfil de salud diferente a lo observado en el país.

La información recolectada permitió verificar que **en Chañaral existe una fuente emisora definida, que corresponde al depósito de residuos mineros ubicado frente a la ciudad**⁴. En la etapa siguiente se determinó que **la población humana adulta está expuesta a metales peligrosos medidos en orina**, con representatividad poblacional⁴. El paso posterior, encontró **efectos en la salud de la población expuesta, los que podrían mitigarse si hubiera algún control de la contaminación o bien se hicieran esfuerzos por identificar precozmente signos, síntomas o alteraciones bioquímicas** que pudieran orientar a un manejo precoz, o mejorar el pronóstico de dichos efectos en salud.

Estudios realizados en julio de 2015

A causa de las lluvias y posteriores aludes ocurridos el 25 de marzo de 2015 en Chañaral, se realizó una visita inspectiva a la región los días posteriores, entre el 30 de marzo y el 2 de abril, evidenciándose **un alto riesgo de enfermedad respiratoria debido al abundante polvo en suspensión, junto a un mayor riesgo microbiológico producto de la contaminación con lodo y la falta de servicios básicos** que vivió la ciudad. Se suman a esto las posibles alteraciones de salud mental dado el evento traumático que sufrió la población. Durante esta visita se planteó nuevamente la preocupación de la comunidad respecto al contenido de metales de los polvos y barro acarreados por el aluvión.

1) Estudio piloto del nivel de exposición a metales y efectos en salud posterior al 25 de marzo de 2015

En julio de 2015 se llevó a cabo un estudio piloto que buscaba evaluar tanto a personas como el ambiente. Dado lo observado en la visita de inspección en relación con los riesgos asociados a metales y el breve periodo de tiempo transcurrido tras el evento, se priorizó medir alteraciones respiratorias y las concentraciones de níquel, cobre y arsénico urinarios en personas adultas. También se buscaba identificar la necesidad de nuevos estudios poblacionales, y establecer si ocurrieron cambios en los niveles urinarios de metales y el perfil de salud de los habitantes, en comparación con la línea basal de la misma muestra evaluada en el periodo 2006-2012.

a) Metodología

Se realizó un estudio epidemiológico de corte transversal, en una muestra a conveniencia de personas adultas que participaron en los dos estudios previos. Se pidió un nuevo consentimiento informado; los voluntarios fueron entrevistados en su hogar por personal capacitado por la investigadora principal.

Cada participante respondió un cuestionario compuesto por secciones seleccionadas del cuestionario utilizado en el estudio del año 2012. Además, a cada participante se le solicitó una muestra puntual de orina para detectar y medir los niveles urinarios de arsénico total, arsénico inorgánico (sólo si el arsénico total fuera elevado), cobre, níquel, mercurio y plomo. Estos metales se analizaron en laboratorios de la Comisión Chilena de la Energía Nuclear (CCHEN), utilizando la técnica validada de Espectrometría de Masas acoplada a un plasma (ICP-MS).

A la vez, se tomaron muestras de polvo de calle, en frente de las casas de las personas evaluadas siguiendo los protocolos de toma de muestra y análisis utilizados por Pastén et al (2014-2015) en las ciudades de Copiapó y Chañaral⁵. A partir de un listado de los entrevistados participantes de

este piloto y que además habían proporcionado una muestra de orina, se obtuvo una muestra del polvo frente a la casa de una de cada 5 personas evaluadas, el mismo día en que esta entregó su muestra de orina.

Estas muestras fueron etiquetadas y trasladadas al laboratorio del académico Pablo Pastén, del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), para la posterior determinación del contenido de metales con un analizador XRF, marca Innovex Delta. En su laboratorio se hizo previamente la calibración para arsénico, cobre, mercurio y plomo con Espectrometría de Masa (ICP-MS). Los resultados obtenidos se compararon con resultados obtenidos por CEDEUS en abril de 2015, utilizando los mismos métodos de muestreo y de análisis. Otra referencia usada fue el valor de metales en suelo residencial establecido en Brasil, asumiendo que el polvo de la calle se correlaciona fuertemente con la porción respirable del suelo superficial en contacto con las personas (a menos de 5 cm)¹⁶.

b) Resultados

Se presentan en primer lugar los datos sobre exposición a metales en orina, luego la prevalencia de problemas de salud respiratoria y finalmente, los niveles de metales en polvo de calles.

En julio de 2015 se recontactaron 103 participantes de los estudios previos. De ellos, el 65% eran mujeres, la edad media de 54 años y el tiempo de residencia en Chañaral, de 47 años. El 34% declaró ser fumador.

Respecto a los niveles de exposición a metales en orina, en la tabla siguiente se muestran los indicadores medidos en Chañaral en julio de 2015, comparados con los observados en 2006.

TABLA 4. CONCENTRACIÓN DE METALES URINARIOS (µg/L) EN MUESTRA DE POBLACIÓN DE CHAÑARAL, EN 2006 Y 2015

Parámetro	2006			2015		
	Mediana	Máximo	Percentil 95	Mediana	Máximo	Percentil 95
Arsénico total	44,6	659,3	233,2	17,9	225,0	140,84
Arsénico inorgánico	17	94	63,2	6,1	18	15,1
Níquel	2,8	17,4	7,2	2,5	3,68	2,77
Cobre	17,9	107,4	41,9	2,5	2,5	2,5
Plomo	0,9	58	4,5	2,5	4,75	2,5

Tal como se observa en la tabla, **en las muestras del año 2015 los indicadores de exposición poblacionales, tanto mediana como el percentil 95, muestran que para todos los metales los niveles medidos son marcadamente inferiores a aquellos observados en 2006.**

Para favorecer su comparación con los indicadores establecidos en el estudio previo¹¹ se muestran las prevalencias de exposición para los metales de interés (tabla 5), observándose también una reducción en todos los parámetros, excepto para el arsénico total.

TABLA 5. PREVALENCIAS DE EXPOSICIÓN A METALES (%) EN MUESTRA DE POBLACIÓN DE CHAÑARAL EN 2006 Y 2015

Parámetro %	2006	2015
Arsénico total > 50 µg/L	13,7	17,0
Arsénico inorgánico > 35 µg/L	16,9	0
Níquel > 4.1 µg/L	30,4	0
Cobre > 13 µg/L	67,5	0
Plomo > 2.6 µg/L	9,3	2,1

La mayor prevalencia del arsénico total (17%) está normalmente asociada a la ingesta de pescados. En esta muestra, la proporción de personas que exceden las referencias usadas en el estudio del 2006 es notoriamente más baja.

Respecto a los efectos en salud, en la muestra evaluada en 2015, se determinaron las siguientes prevalencias de eventos en salud y su comparación con los valores medidos en la comuna y en Chile en 2012 (tabla 6).

TABLA 6. PREVALENCIAS (N) DE EVENTOS DE SALUD RESPIRATORIA EN CHAÑARAL EN 2012, 2015 Y EL VALOR NACIONAL EN LA ENS 2009-2010

Condición	2012	2015	ENS 2009-10
Tos	18,4 (26)	48,5 (50)	8,1 (389)
Asma	27,0 (37)	16,5 (17)	10,1 (529)
Síndrome obstructivo crónico	46,6 (48)	8,7 (9)	25,7 (1109)
Disnea	37,7 (61)	26,5 (27)	18,6 (938)

Llama la atención la menor prevalencia de alteraciones respiratorias medidas en 2015, incluso menores que lo medido por la ENS 2009-2010. Solo se acrecentó la prevalencia de tos como signo agudo respiratorio. Esta comparación es solo referencial y debe interpretarse con cautela, ya que existen diferencias muestrales que pueden afectar las prevalencias medidas.

En este estudio piloto no se midieron otros efectos en salud, como sí se hiciera en la investigación de 2010-2012; la razón se debe principalmente a la sobrecarga del sistema de salud de Chañaral y la inconveniencia de tomar muestras de sangre en el contexto de crisis en que se llevó a cabo esta investigación.

En la tabla siguiente se muestran los niveles de metales en polvo de calles.

TABLA 7. NIVELES DE METALES EN POLVOS DE CALLE EN CHAÑARAL, ABRIL Y JULIO DE 2015

	Julio 2015 (mg/Kg)			Abril 2015 CEDEUS* (mg/Kg)			
	As	Cu	Pb	As	Cu	Pb	Ni
Máximo	36	610	72	80,1	4.304,00	170,2	2
Mínimo	0	237	11	12,1	148	10,2	22,8
Promedio	18	395	35	28	738,7	42,7	4,7
Mediana	18	394	33	22,1	410,5	28,7	2
Percentil 95	27	561	71	68,2	3.156,5	128	15
Norma Brasil	55	400	300	55	400	300	100

* Otros puntos de muestreo.

Las concentraciones de arsénico, cobre y plomo en el polvo de calles recolectado en julio de 2015, son menores a las medidas en abril del mismo año por el equipo del académico Pablo Pastén (CEDEUS), usando la misma metodología. **En ambos periodos se excedió la norma brasilera** en suelo residencial para cobre, dando cuenta de la presencia de este elemento en el polvo que se libera en la superficie del suelo.

Como parte del análisis del estado de la calidad del agua de uso humano en Chañaral 2015, se revisaron datos generados por CEDEUS en abril 2015 y la Superintendencia de Servicios Sanitarios en julio de 2015. En ambos periodos, los niveles de metales regulados en agua –esto es arsénico, cobre y plomo– presentaban valores bajo el valor normado, por lo cual se interpreta que la gestión de agua no ha sido una vía de exposición relevante a metales (datos no mostrados).

c) Conclusiones estudio 2015 y su relación a la información del periodo 2006-2012

De acuerdo a la evaluación de las personas adultas residentes en Chañaral realizada tres meses después de ocurridos los aludes, se estableció que en general **el contenido de metales excre-**

tados a través de la orina es menor que lo medido en las mismas personas en 2006. La única excepción es el nivel de arsénico total, elemento frecuente en orinas de personas residentes en otras ciudades del norte de Chile, especialmente vinculado al consumo reciente de pescados o exposición ocupacional en la minería.

Como indicador poblacional de la exposición a metales y usando los mismos puntos de corte del año 2006, basados en datos internacionales, se evidencia que en Chañaral un **17% de las personas evaluadas tienen niveles mayores a 50 µg/L de arsénico total**, hallazgo similar a lo obtenido anteriormente; **para otros metales de relevancia toxicológica, tal como arsénico inorgánico, níquel o cobre, las prevalencias de exposición son cercanas a 0**, dado que mostraron valores más bajos que el límite de detección de la técnica utilizada (espectrometría de masas).

Las concentraciones de metales en el polvo de calles recolectado en julio son más bajas que lo medido en abril de 2015 por el CEDEUS, usando la misma metodología. Datos disponibles de la zona, entregadas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios en julio de 2015, muestran que los niveles de arsénico, cobre y plomo presentaban valores bajo el valor normado en Chañaral, por lo cual la ingestión de agua no ha sido una vía de exposición relevante a metales. El aporte de metales desde la dieta no fue evaluado en este piloto, por lo cual se sugiere la realización de un estudio de exposición más completo, considerando la ingestión a través de los alimentos.

En resumen, las personas que hoy residen en Chañaral muestran niveles de metales en orina más bajos, lo que podría deberse a cambios en la forma que hoy se produce la exposición. Esto se debe principalmente a que el agua que abastece a la ciudad no contiene metales y a la vez, el polvo que circulaba en julio del 2015 en la cercanía de las viviendas mostró menores concentraciones de metales; el polvo constituye la vía de exposición más importante.

A partir de los hallazgos del estudio piloto de julio del 2015 se pueden establecer nuevas preguntas de investigación para Chañaral. Entre ellas, **se sugiere la posibilidad de que pudiera haberse producido un “efecto de lavado” de los metales en las matrices ambientales de mayor contacto con las personas, como el polvo**. Durante los aluviones puede haber ocurrido una dilución de estos elementos a partir de las aguas y lodos provenientes de la cordillera, reduciéndose la carga ambiental con la posterior reducción en los niveles urinarios de metales en las personas.

El estado de la salud respiratoria evaluado mediante cuestionario estandarizado en los voluntarios del piloto del mes de julio, muestra que **solo aumentó la prevalencia de tos** como síntoma agudo respiratorio con un valor de 48,5%, esto es, **casi la mitad de las personas evaluadas reportaron haber padecido tos en los últimos tres meses siguientes a los aluviones**.

Los demás indicadores de enfermedades crónicas en adultos estudiados mostraron prevalencias menores a lo medido en el periodo 2010-2012, aunque siguen siendo mayores a lo reportado a nivel nacional; la única excepción es el síndrome bronquial obstructivo crónico cuya prevalencia cayó por debajo de los niveles nacionales. Este hallazgo se debe interpretar con **cautela**, dado el **pequeño tamaño muestral y la importante emigración ocurrida en Chañaral tras los aluviones**. Es posible que aquellas personas con problemas de salud respiratoria hayan abandonado la ciudad, en tanto que aquellos sujetos con mejores aptitudes físicas hayan sido precisamente quienes participaron en este piloto, dado que son quienes continúan viviendo en la ciudad. Para verificar un posible deterioro de la validez externa de este estudio es necesario profundizar en los análisis, a fin de verificar si esta emigración también pudiera deberse a la evolución propia de sus cuadros; la información preliminar recogida en este piloto permite plantear la necesidad de realizar una investigación de mayor alcance poblacional para hacer un seguimiento de los habitantes que hayan emigrado de la ciudad y evaluar su vinculación o no con los aluviones.

Palabras finales

El estudio de seguimiento de un grupo de residentes de Chañaral se ha llevado a cabo en tres etapas; la última de ellas en julio de 2015, a propósito del aluvión y el interés por conocer el contenido de los lodos y el potencial impacto en la salud de las personas. En sus etapas anteriores se mostró la existencia de niveles elevados de metales en la orina de las personas, y manifestaciones en la salud, especialmente en su salud respiratoria, destacándose que la residencia en una zona afectada por residuos mineros sin control tiene expresiones perjudiciales en su salud poblacional. Este año, en los análisis de orina y polvos de las calles frente a las viviendas de un grupo de estos habitantes de Chañaral se encontró que no había niveles detectables de metales. Este favorable resultado podría deberse a que los lodos conformados por la mezcla de residuos y aguas desde la cordillera luego se depositaron sobre la ciudad, alcanzando menores niveles de metales. Estos resultados, no obstante, son preliminares y requieren de análisis más detallados, lo que se realizará durante los próximos meses. Sin embargo, dadas las implicancias en la salud y en la calidad de vida de las personas de Chañaral también se requiere de estudios más complejos y completos que los realizados recientemente, incluyendo la vigilancia del estado de salud y los niveles de exposición en las personas junto al seguimiento de la calidad ambiental de la zona.

Referencias

- Chile, S.N.d.G.y.M.d. *Catastro Nacional de Depósitos de Relave*. 2015.
- ATSDR., A.f.t.s.a.d.r. *Toxicological Profiles*. 2015 [citado el 15 de septiembre de 2015]; disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/index.asp>.
- Monroy O, S.G., Herrera A y Serazzi P., *Chañaral 1833-2000. A Tale in the Desert*. 2000, Copiapó, Chile. 222-223.
- Dold, B., *Element flows associated with marine shore mine tailings deposits*. Environ Sci Technol, 2006. 40(3): p. 752-8.
- Castilla, J.C., *Copper mine tailing disposal in northern Chile rocky shores: Enteromorpha compressa (Chlorophyta) as a sentinel species*. Environ Monit Assess, 1996. 40(2): p. 171-84.
- Castilla, J.C., *Environmental impact in sandy beaches of copper mine tailings at Chañaral, Chile*. Marine Pollution Bulletin, 1983. 14(12): p. 459-464.
- Castilla, J.C. y E. Nealler, *Marine environmental impact due to mining activities of El Salvador copper mine, Chile*. Marine Pollution Bulletin, 1978. 9(3): p. 67-70.
- Ab., C., *Niveles de plomo en niños expuestos a relaves mineros en Chañaral*, en *Escuela de Salud Pública*, 2006, Universidad de Chile.
- O., A., *Exposición a Arsénico en población urbana cercana a una fuente de contaminación de relaves en la ciudad de Chañaral*, en *Escuela de Salud Pública*, 2006, Universidad de Chile.
- Organization, W.H., *Manual de vigilancia STEPS de la OMS. El método STEPwise de la OMS para la vigilancia de los factores de riesgo de las enfermedades crónicas*, 2008.
- Cortés, S., *Percepción y medición del riesgo a metales en una población expuesta a residuos mineros*, en *Escuela de Salud Pública* 2009, Universidad de Chile: Santiago de Chile.
- Cortés, S., *Informe Final Fonis SA10120019. Diagnóstico de salud en personas residentes en una zona expuesta a residuos mineros, III Región, Chile*, 2012, Conicyt.
- Salud, M.d., *Encuesta Nacional de Salud 2009-2010*, 2010: Santiago de Chile.
- Cortés S., M., L., Burgos, S, Adaros, H and Ferreccio C., *Urinary metal levels in a Chilean community 31 years after cessation of mine tailings dumping*. International Journal of Occupational and Environmental Health, 2015. En revisión.
- Acosta, J.A., et al., *Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment*. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 144, Part B: p. 298-305.
- Ambiental, C.C.d.T.d.S., *DECISÃO DE DIRETORIA Nº 195-2005- E, de 23 de novembro de 2005, em Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos Valores Orientadores de 2001, e dá outras providências*. 2005: Brasil.

Diagnóstico preliminar de contaminación marina en Chañaral y Pan de Azúcar

Autores

Especialistas

- Dr. Rodrigo De la Iglesia, Profesor asistente, Departamento de Genética Molecular y Microbiología.
- Dr. Santiago Andrade, Laboratorio de Metales, Departamento de Ecología.
- Dr. Juan Correa, Profesor Titular, Departamento de Ecología. Decano Facultad de Cs. Biológicas.

Antecedentes

En marzo de 2015, a causa de un aluvión generado por las fuertes lluvias en la alta cordillera, se produce una entrada masiva de sedimentos y agua en la Bahía de Chañaral, a través del Río Salado, y a 15 km al norte en Pan de Azúcar, rebasando la quebrada del mismo nombre, en la Región de Atacama.

Estas dos bahías presentan historias contrastantes en términos de contaminación. Mientras que Chañaral posee una extensa historia de contaminación por desechos de la minería del cobre, la Caleta Pan de Azúcar no posee antecedentes de este tipo, caracterizándose por estar libre de contaminantes.

Los departamentos de Ecología y Genética Molecular, y Microbiología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Católica, han realizado diversas actividades científicas en esta zona, para estudiar el efecto que la alta contaminación por cobre ha generado en los organismos marinos que habitan el área. Para efectos de estas investigaciones, Caleta Pan de Azúcar ha sido utilizada como área de referencia.

Dos semanas después del fenómeno aluvional, los laboratorios de Microbiología Marina, Algas y de Metales de la Facultad de Ciencias Biológicas, realizaron muestreos en las bahías de Chañaral y Pan de Azúcar, para determinar: i) los niveles de cobre total disuelto en la columna de agua, ii) los niveles de cobre total en sedimentos del aluvión, y iii) los niveles de cobre presentes en los organismos representativos del área de manejo de la Caleta Pan de Azúcar.

Metodología

Se realizaron muestreos de agua, desde la costa, en tres zonas: Caleta Pan de Azúcar, Caleta Palito y Muelle de Chañaral, el día 11 de abril. Posteriormente, el 18 de abril, se tomaron muestras de agua, sedimentos y recursos bentónicos tales como locos, lapas y algas.

Las muestras fueron transportadas, procesadas y analizadas en el Laboratorio de Metales del Departamento de Ecología de la Universidad Católica.

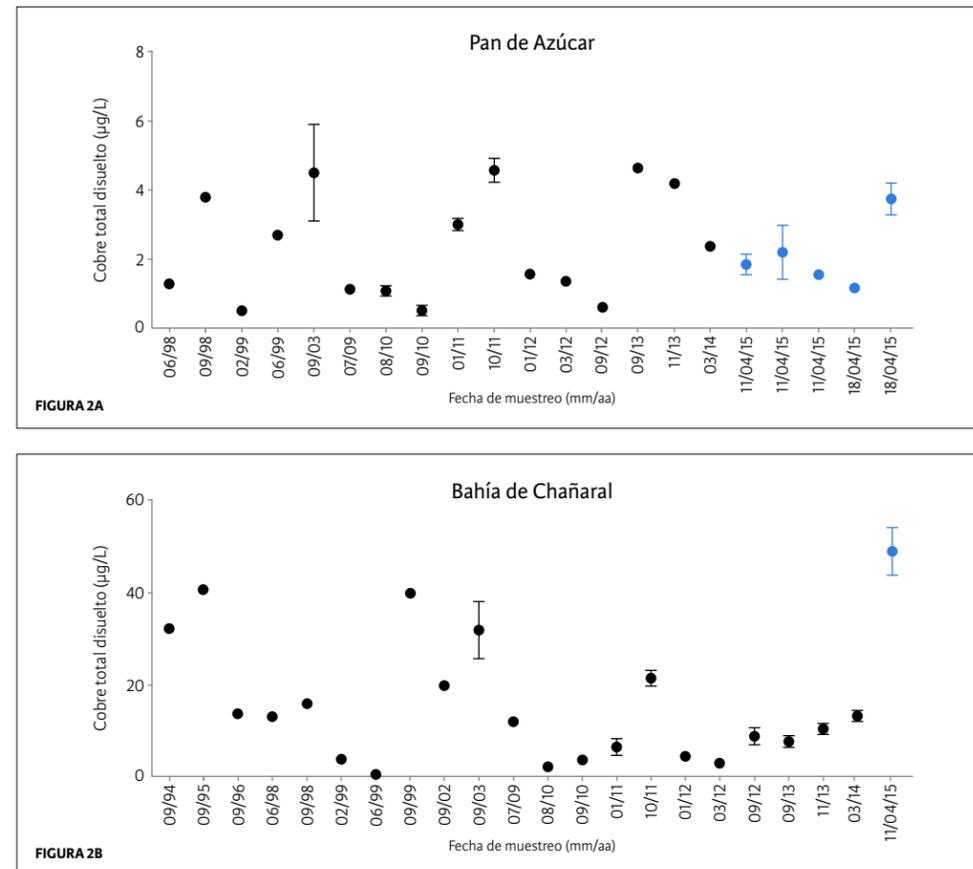
En la campaña del 11 de abril, se colectaron muestras de agua en las caletas Pan de Azúcar, Palito y Chañaral. En la caleta Pan de Azúcar, se realizaron muestreos (por duplicado) en cuatro puntos cercanos, siguiendo la pluma de sedimentos. En la Caleta Palito, se llevaron a cabo dos muestreos (por duplicado), en la zona del canal de descarga y 200 metros al sur del canal de descarga. Finalmente, en la Caleta de Chañaral, se efectuó otro muestreo por duplicado.

En la campaña del 18 de abril, en tanto, se recolectaron muestras en ocho sitios: seis en Caleta Pan de Azúcar, uno en Caleta Palito y uno en la Bahía de Chañaral. En estos lugares, se recolectaron muestras por triplicado de barro, sedimento, agua, algas, locos, lapas y lotias.

Resultados

1) Niveles de cobre total disuelto en agua de mar

Los resultados obtenidos en las dos campañas de muestreo revelan que, en comparación con los máximos y mínimos históricos para niveles de cobre con los que cuentan nuestros laboratorios, **los niveles detectados en Pan de Azúcar se encuentran dentro de los rangos históricos reportados** (Figura 2A), mientras que **en la Bahía de Chañaral exceden los valores máximos reportados** (Figura 2B).

FIGURA 2. VALORES DE COBRE TOTAL DISUELTO EN AGUA DE MAR, EN LAS BAHÍA DE PAN DE AZÚCAR (A) Y CHAÑARAL (B)

Los símbolos negros representan valores históricos reportados en publicaciones previas (Correa et al., 1999; Lee et al., 2002; Stauber et al., 2005; Andrade et al., 2006; Morán et al., 2008; De la Iglesia et al., 2012; Henríquez-Castillo, 2015), los símbolos azules indican las muestras colectadas luego del aluvión de marzo 2015.

2) Niveles de cobre en muestras de barro y sedimentos

Las concentraciones de metales en las muestras de barro/sedimento recolectadas en los distintos sitios están presentadas en la tabla 1. Los sitios 2 al 5 corresponden a muestras de sedimento (barro dentro del agua de mar) recolectadas en la zona de la caleta donde llegó el material del aluvión del pasado mes de marzo. La muestra del sitio No. 7 corresponde a barro recolectado en el cauce de la quebrada por donde transitó el aluvión a la Caleta de Pan de Azúcar. El resto de los sitios, Playa Chañaral y Canal Palito, en contraste con los anteriores, se encuentran fuera del Parque Nacional de Pan de Azúcar.

TABLA 1. CONCENTRACIÓN DE METALES EN MUESTRAS DE BARRO/SEDIMENTO OBTENIDOS EN EL PRESENTE ESTUDIO

Sitios	Concentraciones expresadas en µg de metal / gr de barro (peso seco).					
	Cobre	Zinc	Níquel	Plomo	Molibdeno	Arsénico
2	49,93	24,91	2,84	9,21	1,26	9,72
3	19,81	20,53	1,52	7,26	0,73	6,74
4	22,05	3,66	1,16	4,17	0,62	8,85
5	24,67	24,56	6,27	6,28	0,82	3,42
7 (Quebrada)	69,31	52,76	10,56	22,56	1,63	15,49
Playa Chañaral (8)	354,07	58,43	7,7	17,56	1,41	22,13
Canal Palito (1)	342,76	46,28	5,46	14,86	12,46	19,13

Los resultados indican que **los niveles de cobre en el barro/sedimento en los sitios 2 a 5 de la caleta (tabla 1), son similares a los reportados previamente** para sedimentos de la playa de la Caleta de Pan de Azúcar (Dolt et al., 2006). En el caso de la bahía de Chañaral, el contenido promedio reportado por Dolt (1.000-24.000 µg de cobre (Cu) por gramo de sedimento) es muy superior al detectado en la playa de Chañaral, aunque este excede en un orden de magnitud a lo registrado en Pan de Azúcar. **Estos resultados indicarían que el barro que fue descargado en la Caleta de Pan de Azúcar por el aluvión no posee características de relave.**

3) Niveles de cobre en organismos

Los valores obtenidos en algas recolectadas en el sitio 6 (área de manejo) en el presente estudio son similares a los obtenidos anteriormente (entre agosto 2008 y abril 2010) en algas del mismo sitio en la Caleta Pan de Azúcar, en el rango de 5-15 µg Cu/g peso seco. El contenido de cobre en las algas recolectadas en el punto de descarga del aluvión (sitio 2) es 12,3 µg/gr, un poco más que el doble de las algas recolectadas en el área de manejo de la Caleta de Pan de Azúcar (4,9 µg/gr). **Esta situación evidencia que en 24 días**, que es el periodo de tiempo transcurrido entre que se produjo la descarga del barro en la caleta (25 de marzo) y el momento en que fueron recogidas las muestras (18 de abril), **ha ocurrido un proceso de acumulación de cobre en las algas.**

En el caso de organismos herbívoros, como la lapa (*Fissurella* sp.) los valores obtenidos (40-80 µg Cu /gr) son similares a los previamente reportados. En el caso de organismos carnívoros, como el loco (*Concholepas concholepas*), las concentraciones de cobre determinadas en el músculo del pie de las muestras de estos moluscos estuvieron comprendidas entre 2 y 18 µg/gr; y al igual que los otros organismos considerados, tampoco se observa una relación entre el contenido de cobre en el músculo del pie y el tamaño de los organismos.

Conclusiones preliminares

Los niveles de cobre total disuelto en el agua de la Caleta de Pan de Azúcar son bajos y similares a los registrados anteriormente, y no representan riesgo de toxicidad para los organismos marinos. Por el contrario, **los niveles detectados en Bahía Chañaral son superiores a los reportados con anterioridad.**

El contenido de cobre en el barro del aluvión que llegó a la Caleta de Pan de Azúcar no posee características de un desecho de la minería del cobre. Sin embargo, **el barro que desembocó por la quebrada estaba enriquecido con metales y al momento de entrar al mar, debido a procesos geoquímicos, se produjo la transferencia de metales** desde el material del aluvión (agua y barro) hacia el agua de mar.

Las algas ubicadas en el sitio de descarga del barro en la caleta acumularon cobre proveniente de los metales liberados por el barro al entrar al mar. Sin embargo, los niveles de cobre en estas algas son inferiores a los registrados en las algas del sitio Soldado, el cual sigue siendo considerado un sitio "control" o de referencia.

El contenido de cobre en el músculo del pie de los organismos herbívoros (Lapas y Lotias) recolectados en el área de manejo de la Caleta de Pan de Azúcar, pueden ser considerados como niveles de referencia, ya que son similares a los datos registrados anteriormente en muestras del mismo lugar, e inferiores a los registrados en organismos de sitios con historia de contaminación por cobre.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

- Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales, CIGIDEN
- Departamento de Salud Pública, Facultad de Medicina
- Centro de Desarrollo Urbano Sustentable, CEDEUS
- Facultad de Ciencias Biológicas
- Centro UC de Políticas Públicas
- Vicerrectoría de Comunicaciones



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE