

## SESIÓN 2

### **Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático** **SEBASTIÁN VICUÑA**

Muchas gracias Hernán por la invitación, a los organizadores, a la SOCHID. Mi idea hoy día es presentarles el resultado de varios trabajos que hemos estado realizando un grupo de investigadores de la Universidad Católica, también de la Universidad de Valparaíso, en el centro CIGIDEN, del Instituto de Hidráulica de Cantabria y del Centro de Cambio Global, para tratar de responder una inquietud que tenía el ministerio de Obras Públicas y el Ministerio de Medioambiente respecto a cómo tratar el tema de la infraestructura y el cambio climático.

Este trabajo se desarrolló en tres proyectos consecutivos financiados desde el ministerio de obras públicas y el ministerio de medio ambiente pero también uno de los proyectos fue financiado desde el ministerio de medio ambiente de Canadá, que nos abrió una oportunidad interesante de trabajar en el tema. Mi idea es presentarles primero el marco conceptual que fuimos desarrollando a largo de estos proyectos que relacionan al cambio climático con infraestructura, cuál es la propuesta metodológica para incorporar estos temas en la manera en que el ministerio obras públicas, principalmente, se plantea estos desafíos y finalmente, para no desmerecer la sesión, hablar algo de crecidas y cambio climático como se pueden incorporar esta metodologías en ese aspecto en particular.

Entonces, para partir, esta figura representada a mi gusto la manera más simple o sintética de representar lo que es cambio climático y su relación en la ocurrencia de desastres: lo que dice, de manera básica esta figura, es que el riesgo del desastre una vez que se manifiesta, va a existir cuando ocurran en concordancia, en el tiempo, en el espacio, tres elementos. Una amenaza de origen climático, a distintas escalas meteorológicas; sistema, puede ser un sistema natural, un sistema humano que se ve expuesto a esta amenaza pero a la vez es vulnerable a las amenazas. Si no existen estos tres elementos, no existe el riesgo. Es obvio que si el sistema no está expuesto a la amenaza no va a existir el riesgo, pero tal vez no es tan obvio pero podemos encontrar muchos ejemplos, en donde ocurre si el sistema no es vulnerable a esa amenaza, tampoco va a existir el riesgo.

La amenaza en parte está construida o existe de manera natural, como parte de la variabilidad natural que tienen los sistemas, pero nosotros estamos contribuyendo en distinta medida y con bastante incertidumbre respecto a cómo lo estamos haciendo, en esta amenaza al emitir gases de efecto invernadero y entonces alterar los balances de energía y las condiciones climáticas dentro del planeta.

¿Cómo podemos prepararnos a estos desastres? Hay un componente que se asocia a la gestión del desastre propiamente tal pero también hay un componente más bien de largo plazo, que implica adelantarse tal vez a impactos que podrían

ocurrir en el futuro y a eso le llamamos adaptación. La infraestructura tiene una doble relación con este esquema.

Por una parte, las obras de infraestructura son entes vulnerables en sí, las obras pueden verse dañadas producto de algunos eventos meteorológicos adversos y en este caso, una manera poder internalizar ese tipo de efecto, es tal vez tratar lo que son los criterios de diseño o de mantención de distintos tipos de obras que podrían sufrir con estos impactos.

Por otra parte, las obras son, y van a ser elementos que permiten reducir la exposición de cierto sistema a estos fenómenos climáticos, por ejemplo un embalse va a reducir la exposición frente a la disponibilidad de agua. Aquí los elementos que van a ser claves para ser el criterio, respecto la planificación, donde y cuando, pero también diseño respecto como vamos a satisfacer alguna de estas necesidades de obras de infraestructura, y vamos a tener ejemplos en términos de recursos hídricos, pero también obras que estén destinadas a manejar desastres están relacionada a este tema.

Ahora bien, mirándolo también en horizontes de tiempo más largos, creo que la figura en su base también puede extenderse a considerar posibles oportunidades, por ejemplo, todo lo que es el potencial desarrollo agrícola en el sur del país asociado a mejoras climáticas en el contexto de esa zona. Requeriría, por ejemplo, el desarrollo de nuevas infraestructuras de riego donde hoy día no existe y en ese caso el rol de la infraestructura podría estar más bien asociado a aprovechar una oportunidad. Dejo abierto igual ese punto de vista, porque siempre consideramos, es natural, que esto es negativo, pero podría haber algunos resultados positivos.

Efectivamente, el poder entonces estudiar las amenazas climáticas y cómo estas pueden cambiar producto del cambio climático es bastante relevante, nosotros partimos asumiendo que la metodologías que utilizamos hoy día para diseñar, para planificar, son capaces de enfrentar la variabilidad climática, se construyen de alguna manera tomando en cuenta esos elementos. La pregunta es: ¿cuánta amenaza adicional son capaces de enfrentar estas obras de infraestructura si consideramos los componentes del cambio climático?

Ahora, poder incorporar esta nueva dimensión, poder dimensionar cómo cambia la amenaza en el futuro, producto del cambio climático, es un problema bastante complejo de resolver. Muchas veces tenemos limitaciones, en términos de las observaciones que nos ayuden a identificar señales de cambio, de cosas que estén ocurriendo, incluso proyectarlas hacia el futuro. El tema de las marejadas es un buen ejemplo en este sentido, y además porque obviamente hay muchas otras señales que no son necesariamente climáticas, otros factores que van a confundir la señal o el resultado relevante (por ejemplo, el caso de una inundación no es necesariamente el clima lo más importante, la cobertura y el uso de suelo toman relevancia).

Es un poco más fácil el trabajo de hacer estas predicciones cuando trabajamos en escalas temporales relativamente grandes y también con escalas espaciales relativamente grandes. Esa es información que nos llegan estos modelos de clima global, a la que tendemos a creerle con un mayor nivel de confianza. Pero también cuando nos empezamos a alejar en el tiempo va a empezar a aumentar la incertidumbre, y esto lo voy a mostrar de una manera bien simple, a través de un ejemplo en particular. Lo que hablo de las escalas espaciales, es que los modelos de clima global se construyen con grillas relativamente grandes de 50 a 100 km, incluso 200 km. Y ahí tengo que estar construyendo un proceso de bajada de escala para llegar a las condiciones locales y mientras más estoy bajando en las condiciones, donde me interesa la información climática, más preponderancia tendrá el entorno versus las condiciones globales.

Respecto a la escalas temporales, este gráfico muestra una secuencia de información a nivel histórico, y una proyección cualquiera (está tomada de un modelo de clima global cualquiera). Temperatura, me parece que en la estación en Armerillo en la cuenca del río Maule, y muestra lo esperable, una tendencia al alza en el periodo histórico y después esa tendencia continúa hacia el futuro. Si yo estoy preocupado de algo que va estar ocurriendo en un horizonte de tiempo, y la temperatura fuese la variable de relevancia (obviamente no es la más relevante pero sirve para el ejemplo), si me preocupa algo que va a estar ocurriendo los próximos 20 años, es muy probable que todavía esté dentro de un horizonte donde la variabilidad climática, o la variabilidad que tiene esta variable en particular, va a ser la más relevante.

Si empiezo a hablar del horizonte de tiempo 2050-2060, la tendencia que tendría esta variable en particular nos lleva a una situación en donde ya escapamos de las condiciones de variabilidad natural, y esto bastante relevante al momento en que empezamos a pensar en distintas obras de infraestructura y cómo incorporar eso.

Ahora el problema es que cuando empiezo a pensar en horizonte de tiempo más largo, se amplía la incertidumbre, surgen no solamente distintos modelos que me van a entregar estas proyecciones, distintos modelos de base física que hacen este trabajo, sino que empezamos además a generar o incorporar otro nivel de incertidumbres, que no sabemos cuál van a ser los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, cómo se va a desarrollar el planeta en un horizonte de tiempo tan largo, es una gran incertidumbre y eso van generar entonces un amplio rango de posibles escenarios que tendríamos que estar considerando.

Pero de nuevo, como síntesis aquí esta parte, mientras la escala espacial es grande y la escala temporal también es relativamente grande, tenemos muy buenas herramientas para poder incorporar esta dimensión en el análisis de la amenaza hacia el futuro.

¿Cuál es la propuesta metodológica que surge un poco de este análisis conceptual? Primero, la pregunta que se nos hacía originalmente desde el ministerio de obras públicas, cuál era el enfoque que debía seguirse para evaluar la adaptación al

cambio climático en la infraestructura del MOP. Nosotros consideramos que esa pregunta se tenía que abrir en dos preguntas de base. Una, primero había que decidir si efectivamente era relevante incluir la temática del cambio climático en algún tipo de obras particulares y donde fuese relevante, tratar de entonces desarrollar una metodología que ayudase a incorporar, en el marco de las distintas etapas de evaluación de esa obra, esta nueva dimensión, esta nueva amenaza.

Entonces la metodología parte de esta manera: con una suerte de esquema de flujo donde se hace una evaluación inicial donde hay dos elementos que pasan a ser claves para definir si efectivamente la obra es relevante el contexto del cambio climático. El primero y es el más claro, es contemplar cual es el ciclo de vida del proyecto: si el ciclo de vida es una obra que va a estar protegiendo un cauce, que yo sé que la voy a estar evaluando cada cinco años, respecto al rol que está cumpliendo, y que está considerada en su inicio la necesidad de modificarla en ese marco de tiempo, el cambio climático pareciera no ser una buena estrategia para seguir. Porque no estamos coincidiendo en el horizonte de tiempo en donde esta dimensión pasa a ser relevante.

El segundo elemento que pasa a ser también importante, es considerar lo costoso que puede llegar a ser incorporar este tipo de amenaza para ciertos tipos de problema. De nuevo, mientras más local, mientras la escala temporal es más fina, es más costoso, e incluso de muy dudosa capacidad, lo que tendríamos para poder representar variables con ese nivel de sofisticación. Lo ponemos en términos genéricos: si los costos para generar esa información superan o son muy relevantes respecto a lo que significa en términos de costos directos de la obra o los beneficios que va a generar, pareciera, de nuevo, que no es tampoco pertinente incluir ese tipo de obra en la evaluación de este tipo de proyectos.

Por ejemplo, una APR que tenga que diseñarse para satisfacer una población de cien personas, la obra probablemente tiene un ciclo de vida largo en la duración que va de esa población, pero los costos para llegar y analizar en el contexto de las disponibilidades de agua para esa APR, todo lo que significa la bajada de escala de los modelos, probablemente no justifica incorporar la dimensión de cambio climático en la evaluación de esa obra.

De una manera simple, uno se queda al final con que, obviamente, los grandes proyectos de infraestructura debiesen ser los que uno debiese empezar a considerar en términos de esta nueva amenaza y surgieron entonces en una de las etapas iniciales del proyecto, de que tres tipos de proyectos parecían relevantes: embalses, puentes y puertos. Desarrollamos metodologías específicas para analizar cada uno de estos tipos de obras, además discutimos y esto está en el contexto de cómo ocurre esta evaluación, de que también tenían que haber cambios metodológicos, por ejemplo, en la manera que económicamente se evaluaban estos proyectos. Qué pasa cuando el proyecto tenga un impacto que va creciendo en el tiempo, qué tasa de descuento tengo que utilizar (que es muy distinto a la manera clásica en que se evalúan estos proyectos, en que yo comparo dos fotos en el tiempo y donde no

tengo este efecto no-estacionario de una variable que va evolucionando en el tiempo).

Además definimos que hay una serie de medidas transversales, todo esto va nutriendo lo que va a ser en potencia un plan de adaptación para el sector, y definíamos que tenía que haber algún nivel de coordinación institucional y temática, y mejoras en los sistemas de monitoreo tanto de la amenaza, como de la vulnerabilidad. El estado de las obras, por ejemplo, era algo que tenía que estar mejorándose en cuanto su monitoreo.

Crecidas y cambio climático ¿qué lo que podemos decir al respecto? Pues voy a pasar rápido porque por algunas estas imágenes: hacia el futuro se proyecta para la región, para Chile, aumento de los niveles de temperatura. Para el caso particular de Chile, además de estos aumentos de temperatura, se proyectan disminuciones en los niveles de precipitación, especialmente la zona centro sur del país y compartimos ese futuro también con la zona sur de Argentina.

Si proyectamos y consideramos los escenarios hacia el futuro (este es un trabajo que se realizó en la cuenca del río Mataquito) vemos que las proyecciones a escala más global si lo bajo a la escala de una cuenca, muestra también el mismo tipo de proyección: un futuro más seco y un futuro más cálido. Un trabajo en que estuvimos analizando las distintas estaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca del Mataquito dio cuenta de que al parecer este tipo de amenazas ya están ocurriendo: aumento de los niveles de temperatura, disminuciones en los niveles de precipitaciones (precipitación anual), están siendo ya observado de manera estadísticamente significativa, en esta cuenca particular.

Pero además observamos que ocurrían dos procesos hidrológicos que al parecer eran originalmente contraintuitivos al mismo tiempo: un aumento los caudales máximos y una disminución en los caudales mínimos. La hipótesis que se plantea en este trabajo, es que producto del alza del nivel de la nieve, tienes una menor acumulación, especialmente en los meses de otoño y comienzos del invierno, eso provoca algunos estos eventos extremos al comienzo de la temporada de lluvia, y al haber acumulación de agua la cordillera producto combinado de las alzas de las temperaturas y disminución de precipitaciones, tienes menores caudales en los meses de verano.

¿Que consiguió este trabajo? El puente de nuevo cae dentro de la categoría de los posibles candidatos a pasar a esta fase dos de evaluación, y entonces se desarrolló una metodología que trataba de revertir algunos de los supuestos básicos que se utilizan para hacer análisis, por ejemplo para diseño de puentes, el supuesto de estacionariedad que quiere decir que las condiciones estadísticas no cambian hacia el futuro y la utilizo para hacer todos los análisis de riesgo y de frecuencia y de probabilidades de distintos eventos, y después de un análisis que típicamente se basa en el modelación de lluvia-escorrentía de eventos específicos para poder modelar la sollicitación que va a tener este tipo de obras.

En el futuro, uno debería estar pensando que la caracterización del riesgo va a estar en un contexto de condiciones no estacionarias y eso requiere de cambios en las maneras estadísticas en que tratamos la variable y también surge la necesidad de tal vez no hacer modelación hidrológica en base eventos, sino que una modelación hidrológica continua. Y eso fue lo que realizamos en el caso de la cuenca del Mataquito, bajamos desde la escala global a la escala local en términos del desarrollo de la serie de tiempo climática y después con un modelo hidrológico distribuido, analizamos cuál eran las condiciones hidrológicas a escala diaria que podrían ocurrir bajo distintos escenarios.

Los resultados, rápidamente, es que primero, cuando consideramos períodos de retorno relativamente bajos, vemos que no hay grandes diferencias entre la condición histórica y futura independiente casi del escenario de emisiones entre 4.5 y el 8.5 hay mayor emisión de gases de efecto invernadero. Pero para períodos de retorno alto y en especial para los escenarios con mayor nivel de emisiones, vemos que hay diferencias importantes en el futuro respecto a las condiciones históricas. Si consideramos lo que en esta cuenca, en el punto en donde se están haciendo las modelaciones, un caudal de diseño relevante está al orden de los 4000 m<sup>3</sup>/s, los resultados mostraban que para un período retorno de 100 años y especialmente entonces en este escenario con alto nivel de emisiones, iban a superarse esos niveles originales de caudal de diseño. Por lo tanto, esto iba a tener implicancias en un potencial diseño de puentes en este lugar.

Las conclusiones del cambio climático es que tiene claras relaciones con el diseño, operación y planificación infraestructura. Es posible, pero bastante complejo en algunos casos, incorporar nuevas metodologías respecto a la evaluación de la infraestructura bajo este contexto alternativo de amenaza; y los puentes, al igual que embalses y puertos, aparecen como una obra relevante en el contexto además de las amenazas específica que podrían ocurrir en caso de Chile.

## **Preguntas**

*¿Cómo hacen el downscaling espacial? Porque bajar de una celda de 2.5° a escala de cuencas debe ser complejo.*

Hay distintos métodos, están los métodos dinámicos donde se anida un modelo de base física a una resolución más fina en el contorno de un modelo de escala gruesa y se corren los dos acoplados: el modelo de escala gruesa da las condiciones de borde a este modelo de escala física; y hay un downscaling estadístico que hace un mapeo desde las condiciones a escala más grande a las condiciones locales, un mapeo estadístico, distintas maneras de hacer ese mapeo, pero se hace en base a cuantiles, y ese mapeo histórico se proyecta hacia el futuro. Esas son dos formas bien sintéticas de cómo se proyecta ese downscaling.

*Quedé bastante preocupado, porque de acuerdo a la proyección que mostraste para los diseño de los puentes, hay un margen de casi tres veces, que podía ser tres veces el caudal de diseño. Yo me pregunto qué pasa en un embalse, que estamos*

*diseñando con crecidas del 1000 año de período de retorno, con verificación para 10,000 años de período de retorno ¿Qué pasa en esos escenarios, que va a pasar con los caudales en esos casos?*

No lo hemos analizado, al menos desde ese punto de vista; sí hemos analizado los embalses en otro contexto que es igualmente relevante, cuando proyectamos un embalse, el rol que va cumplir empieza a ser relevante si es que ese embalse lo vamos a poder llenar de agua o no en un futuro, además de la parte del efecto que puede tener, el daño a la obra: el rol principal tal vez no lo va a poder cumplir. Eso lo evaluamos al menos en un caso, de un proyecto que se está evaluando en la cuarta región, en el embalse Valle Hermoso. Hicimos un análisis simple de lo que significaban estos escenarios bajo ese criterio, o sea simplemente el rol que se espera tener del embalse, si lo va a cumplir o no, que nivel de incertidumbre va a cumplir ese rol en el futuro. Pero no hemos llegado a hacer esos análisis, al menos no con esos períodos de retorno.