

Desafíos en el manejo sustentable de los ríos en Chile

LUCA MAO

Hola. Como el tema de la sesión es de crecidas, voy a hablar sobre los desafíos en la modelación de las crecidas: pues bien, desde una perspectiva disciplinaria distinta, desde la geomorfología fluvial. Para hacer mapas de peligro de inundación que hay que sobreponer luego a un mapa de vulnerabilidad, usualmente se hace una simulación hidráulica, usualmente se toma un modelo de elevación del terreno lo más detallado posible, con los datos hidrológicos de input, se hace una modelación bidimensional usualmente, luego se ocupa una matriz de las dos variables que salen de la modelación, la velocidad y el calado para crear mapas de peligro, esto es el estándar.

En la realidad las cosas son mucho más complejas y son mucho más difíciles de predecir: los modelos hidráulicos no consiguen llegar a tantos detalles, vimos el caso de Cristián [Escauriaza] donde hicieron una modelación hidráulica bidimensional considerando un flujo de sedimentos más alto, no newtoniano. Eso es todo un desafío, que es sólo juntar la conservación de los sedimentos, pero hay otros problemas en terreno. Hay derrumbes, hay movimientos de masas que crean inputs instantáneos en la red hidrográfica en momentos y lugares que son muy difíciles de predecir. Estos volúmenes de sedimentos pueden bloquear temporalmente también los cauces fluviales y crear rupturas instantáneas de estos diques naturales, como si se creara un flujo hiperconcentrado o una pulsación de caudales líquidos.

Hay transporte de sedimentos, y el transporte de sedimento, sobre todo de sedimento grueso sobre todo en ríos de alta pendiente, es muy difícil de modelar. Hay muchas formas de transporte sólido, nadie sabe cuál realmente funciona bien, y además no es solamente el material grueso transportado en el fondo, hay también material que es transportado en como material que flota: muchos troncos en áreas de cuencas con cubierta vegetal. Nadie sabe realmente cómo se transportan los troncos durante las crecidas, donde son reclutados y cuántos son transportados y cómo se acumulan en secciones críticas (en un puente, por ejemplo).

Hay movimientos de río lateralmente, hay erosiones de márgenes, hay movimientos verticales también, a veces hay sedimentación, a veces hay erosión: no hay modelos que sepan hacer estas simulaciones muy bien. A veces los ríos literalmente cambian su trazado con oclusiones. Las modelaciones hidráulicas no funcionan realmente bien en estos casos, en casos de ríos de montaña de alta pendiente. Hay alternativas, por ejemplo, modelaciones morfodinámicas que consideran al mismo tiempo el transporte de sedimentos en un fondo que se mueve. Entonces resuelve en cada celda el transporte de sedimentos y que muevan los canales. Sin embargo, son muy difíciles de aplicar porque es un pronóstico computacional y finalmente aunque que funcionan, uno no sabe cómo calibrarlo, no sabe cómo validarlo, si no tiene datos de terreno. No sabe realmente cuánto caudal sólido entra en la primera celda y cuánto sale de la última celda, si tiene que calibrarlo con datos de terreno y

aunque haya datos de terrenos, son muy puntuales. Así que funcionan sólo por casos específicos, estamos todavía poco al debe del punto de vista académico. No sabemos realmente que pasa durante las crecidas, se podría ver con una serie de dibujos, en donde nosotros vemos cómo se comportan las vaquitas, cuando pasamos con el auto, pero cuando no las vemos, podrían hacer cualquier cosa. Y lo mismo podríamos decir de un río. Porque cuando no hay agua, podemos medir las secciones transversales, la batimetría, hacemos mediciones de caudales bajos y de transporte suspensión. Pero durante la crecida, estamos observando que está pasando y no medimos. Porque es muy desafiante medir en condiciones de crecida.

Los problemas más principales en los ríos de montaña, donde las crecidas son más breves, difíciles de predecir, siempre es difícil estar ahí (si la crecida es un fin de semana), y nadie quiere ponerse dentro del río cuando hay una crecida. Entonces hay muy poco sobre transporte de fondo, realmente muy pocas mediciones en Chile. Hay modelos, pero no modelos que después se puedan aplicar a gran escala, sobre donde se verifican la erosión y de cuantos metros, depende mucho también del material y no hay datos sobre cómo son los sedimentos en los márgenes de los ríos.

Incisión y sedimentación, no sabemos cómo ocurre. Cambios morfológicos, como la acumulación de barras, erosión de islas, transporte de troncos, sobre todo en transporte de troncos es muy problemático en cuencas forestadas. Usualmente lo que se hace es devolver los troncos de los ríos, pero lo que pasa es que durante crecidas grandes, que transportan sedimentos, muchas veces el tronco es reclutado por el eje mismo del río, como erosión de márgenes, erosión de islas y es reclutado en la cuenca por derrumbes, realmente al final no sirve mucho regular los troncos que están en el río frente crecidas extraordinarias. Por otra parte, un ecólogo fluvial puede decir los troncos dentro de los ríos son una ventaja porque ofrecen diversidad ecológica al río, porque aumentan el valor ecosistémicos de sus sistemas fluviales.

Si estuviéramos dibujando un mapa como lo hacían en el pasado tendríamos que poner un dragón, o un león aquí, y decir no sabemos qué está pasando, como lo hacían los viejos mapas, cuando no sabían que poner: estaban en la frontera del conocimiento en este caso. Los ríos de Chile son justamente así, son los ríos en donde es más difícil hacer este tipo de cálculo y simulaciones, y llegar al conocimiento que permita hacer un buen manejo. Ese es el caso del Maule, Biobío y Toltén, por ejemplo, los dividimos en tramos y medimos la pendiente, la mayoría son mayores al 1%, llegan al 10% de pendiente: en estos casos son ríos donde las simulaciones hidráulicas no funcionan bien. Vimos un poco la relación entre el ancho del río y el ancho del valle y la mayoría de los tramos son confinados o semiconfinados, significa que están muy en conexión con lo que pasa en las vertientes, entonces la llegada de fuentes puntuales de sedimentos son muy importante en la dinámica de estos tramos.

Hay alta conectividad con procesos de vertiente, coladas detríticas que pueden pasar a la vertiente y que pueden influenciar mucho el transporte de sedimentos en los valles: esto es una pequeña subcuenca en San Alfonso, en el Maipo, enero 2013. Acababa de llegar a Chile y Santiago se quedó dos días sin agua, por algunos

fenómenos de transporte de sedimentos puntuales, en esta subcuenca, fundamentalmente y no hay mucho registro de estos eventos porque son cuencas pequeñas, usualmente no hay mediciones, no conocemos que realmente la geomorfología, la dinámica de estos arroyos. Finalmente en estos ríos de alta pendiente con mucha conexión con la cuenca, hay crecidas con gran carga de sedimentos y nadie a poner con un sistema de medición en estas condiciones.

Entonces los desafíos en el general, en la perspectiva que geomorfológica, es que son justamente estos riesgos residuales lo que no consideramos al principio lo que proporciona mayores problemas durante las crecidas, por ejemplo, sedimentaciones en secciones críticas, en puentes por ejemplo; cambios geomorfológicos, acumulaciones de troncos en puentes (por ejemplo, en Chaitén tuvieron que retirar los troncos con máquinas operadoras, sino, el puente hubiera colapsado); también cómo se relacionan las acciones e intervenciones antrópicas con las crecidas, por ejemplo, que pasó con extracción de áridos, hay cambios morfológicos que dependen de estas intervenciones y no sabemos cómo el río puede responder a una crecida estos tramos.

Entonces bajo la perspectiva geomorfológica, hay algunas experiencias interesantes y lo que no se puede hacer durante las crecidas, o lo que no se puede realmente modelar, se puede medir después y esta experiencia puede ser muy útil, esos son los análisis post-evento. Lo que se puede hacer, por ejemplo, es medir hasta donde llegó la crecida en varias secciones y sacar una estimación del caudal, o verificar testigos o trazas geomorfológica del tipo de proceso que ocurrieron, una colada detrítica, si era un flujo hiperconcentrado para estimar la granulometría del material, para estimar la concentración de sedimentos durante flujo, para ayudar las simulaciones morfodinámicas después.

Se pueden hacer mapeos de derrumbes o de movimiento de masas, para estimar los volúmenes que llegaron dentro del cauce y algunas experiencias, por ejemplo en una región europea en donde tienen un servicio de unas personas, no mucho, que se ocupan de verificar post-evento los daños y la dinámica que ocurrieron durante estos eventos, lo clasifican (tienen como un fichero), y por año hacen una estadística, digamos geográfica, de este tipo. Si está hecho de forma ordenada, puede proporcionar mucha información interesante, por ejemplo, en este caso relaciones entre la magnitud de la crecida y el aumento del ancho de río, ensanchamiento de río, cambio morfológico durante crecidas.

Ningún modelo numérico realmente permite modelar estas cosas, igual en la realidad hay órdenes de magnitud de diferencia entre distintos procesos en distintos tramos, pero igual es algo. Se pueden verificar los volúmenes de sedimentos reclutados por volúmenes de material orgánico, de troncos reclutados en varios tramos, se pueden verificar los cambios morfológicos; y se puede relacionar esto con la geomorfología del lugar, por ejemplo, la pendiente, el grado de confinamiento lateral de estos tramos, etc. Se pueden relacionar los canales peak con el área de la cuenca en cuencas pequeñas en donde nadie realmente pone un sensor, nadie

mide el caudal cuencas con un área inferior a 100 km², en Europa tampoco: esto proporciona datos muy preciosos.

Se puede hacer un inventario post-evento de inestabilidades en ladera, y con modelos digitales de alta resolución, que son relativamente baratos: ahora, se pueden sacar con algoritmos automáticos y verificarlo luego en terreno con fotos aéreas. Hay distintos tipos también de movimientos de masas: si tengo los movimientos de masa puedo también saber, dependiendo del uso de suelo, donde se reclutaron los troncos que fueron transportados después durante la crecida y cuantos y hacer estimaciones sobre los volúmenes. Se pueden hacer cálculos sobre las secciones críticas, se pueden resistir frente al transporte masivo de troncos o por lo menos identificar dónde están las secciones críticas frente a estos fenómenos.

Otra cosa, es que no es lo mismo tener una una fuente de sedimentos en la parte alta de la cuenca, que una fuente en la parte baja de la cuenca: y no solamente en la localización en la cuenca sino también en la conectividad que hay entre distintas porciones de la cuenca, y con modelos digitales de terreno (ahora son baratos a alta resolución también, hay uno a 10 m que estará pronto disponible para todo el país), se pueden hacer estimaciones de este tipo, en donde uno ve, que hay porciones de de algunas cuencas que no están conectadas bajo un punto de vista de transporte sedimentos, al desagüe, por ejemplo. Entonces ayuda a priorizar también las intervenciones.

Y si uno pone todas estas variables en un marco hidromorfológico puede llegar a algunos indicadores, por ejemplo, clasificación de dinámica de eventos, que se puede dar por un lado la consecuencia morfológica esperada frente a una crecida en ciertos tramos, que depende de la conexión con las vertientes, del tipo de estabilidad que hay en los márgenes, y en el historial de cambio morfológico en eventos pasados. Se llega a cuatro clases, en este ejemplo. Por otro lado, obstrucciones esperables dependiendo de volúmenes de troncos que hay en los lugares de la cuenca con inestabilidad o inestabilidad potencial, y localización y tipo de secciones críticas (por ejemplo, puentes) subdimensionados para el transporte de troncos

Cuando llego a clasificar de esta forma todos los tramos de la red hidrográfica, puedo entrar en una matriz de este tipo, donde entran los cambios morfológicos y la probabilidad de que las secciones críticas estén bajo amenaza por el transporte de troncos y llegar clasificar tramos por amenaza hidromorfológica, o sea tramos relativamente estables y con poca posibilidad de oclusión versus tramos en donde se pueden tener cambios morfológicos y posibilidades de avulsiones [sic] y oclusiones.

Esto junto a otros criterios, por ejemplo la movilidad histórica que se puede mirar en fotos históricas, gran eventos del pasado, confinamiento físico; permite llegar a mapas de peligro hidromorfológico que pueden acompañar a una modelación hidráulica más clásica. Esto es lo que en Europa se está haciendo porque hay dos

directivas: una es la directiva marco del agua, que busca que todos los ríos lleguen a un buen estado de condición hidromorfológica, pero por otro lado, hay una directiva sobre crecidas que pretende reducir el riesgo en todos los tramos.

Entonces hidromorfología, esta disciplina que busca comunicar la hidráulica y la morfología, busca un buen *trade off* entre los dos, conocer el estado morfológico de conservación de estos ríos, pero también usar la morfología y la morfodinámica fluvial con datos de terreno o datos post-evento, para llegar a una buena clasificación de tramos de ríos bajo un punto de vista hidromorfológico. Lo que se puede descartar de esta experiencia, es que bajo, mi punto de vista los estudios post-evento son importantes, es muy difícil medir cosas durante la crecida, pero es relativamente fácil medir después, sobre todo ahora que es más barato, con drones también se pueden tomar fotos aéreas y sacar modelos digitales del terreno de forma relativamente fácil.

No es una alternativa a la simulación hidráulica, pero puede agregar los componentes, quizá sea preciso agregar un componente empírico conceptual, como las que vimos aquí, de naturaleza morfológica, hacia metas determinísticas clásicas, hidráulicas. Es particularmente importante ver las áreas de fuentes de sedimentos, sino podemos medir el transporte de sedimentos, y la conectividad de las distintas porciones de la cuenca al desagüe, y evaluar la naturaleza de los cambios morfológicos esperado durante crecida, y finalmente si es que se puede - se debería, yo creo - empezar a medir el transporte de fondo, por lo menos en algunos ríos, para ver cuales son las fórmulas que realmente funcionan mejor en distintas condiciones, midiendo en un tiempo largo también porque sabemos que la crecidas son puntuales y nunca sabemos cuándo va a ocurrir, entonces hay que medir a largo plazo.

Finalmente faltaría otra componente para llegar a lo que conocemos en la literatura como ecohidromorfología, considerar también la ecología y esas tres disciplinas deberían conversar más. Hace unos años atrás con algunos colegas escribimos un pequeño paper sobre la necesidad de un enfoque hidromorfológico para la gestión de los ríos chilenos, donde pusimos algunos de estos conceptos. Es necesario un enfoque hidromorfológico para la gestión de los ríos chilenos, no sólo frente a crecidas también frente a otro tipo de intervenciones o proyectos. Muchas Gracias.

Preguntas

Respecto a la medición del transporte de fondo, ¿lo mides de qué forma y cuando tienes eventos grandes, que te puede llevar lo que sea que esté midiendo, y de qué manera puedes acumular la información durante ese tiempo de forma de post-procesarla después, analizarla, compararla, ocuparla para validación?

Es todo un desafío en sí, es un universo en sí la medición de transporte de fondo. Se puede medir de forma directa, con mostradores y claramente durante crecidas es difícil, lo que se puede hacer con una máquina operadora, por ejemplo, ponerle un mostrador al final de un brazo operador y ponerlo en el lecho y sacar muestras. O poner estaciones fijas con trampas de sedimentos que funcionan por crecidas

ordinarias digamos, para las crecidas extraordinarias es más difícil, y también hay ahora sensores indirectos, que son como placas o tubos que tienen sensores adentro que miden velocidad de impacto de las piedras en estos sensores y si uno consigue calibrar estos sensores con alguna medición directa, tiene por lo menos un registro de cuándo empieza el transporte, de cuando acaba, de la dinámica del transporte fondo durante un evento, y si lo calibra, también tiene el tamaño de los sedimentos que se mueven.

¿Es posible la cantidad de masa que estás moviendo, también?

Sí son calibrados bien estos sensores, sí se puede. Hay mucha experiencia, experiencia en Japón por ejemplo, en Austria y Suiza, en los alpes están implementando. Pero los japoneses la llevan.

Una pregunta para Luca. Yo recuerdo que antiguamente se usaban técnicas de trazadores para cuantificar el movimiento de los sedimentos. No sé si se están utilizando actualmente estas técnicas; también recuerdo en alguna oportunidad que se colocaron como cadenas verticales unidas hasta el fondo, de esta manera, cuando pasara una crecida, se pudiera ver cómo se movían esas cadenas, ver hasta dónde habían llegado, y esta manera poder determinar cuál es el movimiento del fondo: la incisión o la erosión que esto había producido, y por eso, indirectamente determinar cuál es el transporte de sedimento de fondo. Que es un poco más lo que cuesta determinar. ¿Esas técnicas se están utilizando hoy en día o no?

Eso es muy cierto, efectivamente. Precisamente yo tuve un FONDECYT e hice estas mediciones con un sensor indirecto pequeño en un pequeño arroyo en el Cajón del Maipo y abordamos esta técnica también, las cadenas verticales y los trazadores. Ahora, para los trazadores, al principio se ocupaban como piedras coloradas, ahora se hizo como un salto tecnológico, se pone dentro de piedras de distinto tamaño un chip y luego con antena móvil o con antenas fijas en el río se puede ver cuándo se mueven, cuánto se mueven por cuántos metros. Así que efectivamente de esta forma, se puede estimar una distancia de transporte, la velocidad de transporte y volumen de sedimento. Esto es mucho más barato pero requiere de mucho trabajo en terreno: después de cada crecida, ir a buscar las piedras, básicamente. Pero es entretenido.

Muchas veces se recupera solo un porcentaje de esos chips que se instalan, y las cadenas se llaman cadenas de erosión, que uno pone en el fondo, son bien efectivas; y el último que podríamos agregar es el hidrófono, que no ha sido muy efectivo, pero que es poner un micrófono dentro del agua y sentir el sonido, el sonido transformado como presión acústica, se analiza esa señal y esa señal se transforma en energía que viene del golpe del transporte de sedimento de fondo. Hay un campo amplio por ver ahí.

Yo tengo uno y mide todo, todos los sonidos, uno pasa con el auto cerca del río y hay ruido que viene de eso también, por eso es mucho más difícil limpiar la señal, tenemos turbulencia que generan ruidos, pero es una alternativa barata.

Los japoneses en cuanto a los geófonos, que son estas placas, ya lo tienen bien calibrados para algunas secciones de ríos de montaña, sobre todo.

¿Cuál es el tamaño que tienen estos sensores?

El más pequeño es como 1.5 cm de largo y 1 mm de diámetro, hay más grandes. El tamaño del sedimento que puedes medir dependerá del tamaño de esta de estos sensores, pero más pequeño es el sensor, más pequeña es la distancia que tú puedes encontrar el sensor con la antena. Si tú tienes una piedra grande, le pones una piedra grande, la puedes encontrar a un metro. Pero en una piedra pequeña tienes como máximo 20 cm de cobertura de la antena para encontrarlo, si está sumergido en otros sedimentos.

¿Y cómo lo haces? ¿Ocupas el supuesto del tamaño de las partículas de sedimento que no estás midiendo, intuyes que un porcentaje de las partículas más pequeñas se movió porque se movió una cantidad de partículas más grandes, con sensor?

Generalmente uno ocupa un rango de técnica. Con el mostrador tú puedes mostrar la arena y la grava, pero el mostrador tiene 50 cms de ancho, entonces no funciona para sedimentos más gruesos, entonces ahí tú le pones el chip, para los más pequeños puedes hacer mediciones directas, esa es una opción.

Luca, una consulta. Tiene que ver un poco con los temas de sedimentos pero no directamente con la medición y todo esto, que quizás puede que tengas conocimiento en el área: últimamente se han visto casos, como cuando se ha cortado el agua en Santiago, donde hay crecidas que están rayendo mayor cantidad de sedimentos y mayores turbiedades, y ha pasado en distintas regiones también. ¿Tienes información de que efectivamente hay una tendencia con respecto a las crecidas anteriores a como son ahora? En la idea de los sedimentos.

No podría contestar bien esa pregunta, no lo sé realmente.

(Responde Milo Millán) Eso está asociado justamente a lo que hablamos de cambio climático, lluvias cálidas lluvia de verano donde llueve en la parte alta de la cordillera y hay sedimento que está disponible ahí en laderas con pendiente fuerte, ese es un fenómeno que hay que seguir estudiando: cual es recurrencia de estas lluvias cálidas que son las que generan los grandes aportes de sedimentos.

(Luca) Y para agregar quizá, también habría que medir mejor el transporte en suspensión, ya que los turbidímetros no son realmente muy caros, se podrían poner más, para ver efectivamente de dónde viene el sedimento y si se puede prever antes

que lleguen a secciones críticas esta gran masa de sedimento en suspensión, sin que ocurran fenómenos como los que mencioné.