Sistemas lacustres: Predicción de eventos de resuspensión de sedimentos en el lago Tahoe, California

PATRICIO MORENO

Buenos días, les voy a hablar sobre simulaciones de olas y tratar de identificar eventos de resuspensión de sedimentos en el lago producidos por esas olas, que se producen por eventos de vientos importantes. Para contextualizar, el tema de la resuspensión de los sedimentos es importante porque el hecho de que, con el tiempo, nutrientes y contaminantes se vayan depositando en trazas pequeñas y que vengan eventos de resuspensión que son pocos frecuentes, generan que esa resuspensión provoque concentraciones altas de nutrientes, o ya sea contaminantes, provocando varios efectos.

Pueden ser primero desde la perspectiva de solamente el sedimento en sí mismo, que puede generar pérdida de claridad y por lo tanto, una disminución de la penetración del sol, y efectos sobre el fitoplancton y las microalgas para su crecimiento, cambios de temperatura en la vertical, en el caso de que hayan muchos nutrientes – algo que ocurre mucho en Chile con el caso de la agronomía – que se depositen y que puedan ser resuspendidos de un golpe, y con altas concentraciones generar crecimiento indiscriminado de algas, y finalmente liberación de contaminantes.

Ahora, por algún motivo, el lago Tahoe en particular es un lago que está ubicado entre California y Nevada, un lago que aparece en muchas películas, entre ellas el Padrino, en donde sale gente que no tiene “problemas para pagar la luz”, digamos, y que tiene casas acá, es un foco turístico importante, es precioso en verano y en invierno, y por tanto es un foco de ingresos importante y gracias a eso, desde los años 1960 hasta hoy día se ha estado midiendo la claridad del lago: se mide con el *Secchi Disk*, que es un disco blanco, que se tira con una cuerda al agua desde un barco, y cuando dicen “ya no lo veo”, miden la cantidad de cuerda que avanzó, y lo marcan.

Y esa estadística está desde fines desde los años ’60, y por lo tanto nos permite ver que hay un detrimento en la claridad del lago. Es un lago muy claro, que tiene esa particularidad: como ustedes pueden ver aquí, por lo tanto hay miedo, hay temor, de que se esté deteriorando en forma muy rápida y se pierda el foco turístico que tiene. Esa es la motivación personal.

El lago Tahoe es profundo, más de 500 metros, o sea, es muy profundo, 35 kilómetros en su longitud máxima y 12 kilómetros en su ancho máximo, volumen de 156 km^3, un tiempo de retención de los 700 años. Ubicado en la parte norte de California, entre California y Nevada, y su batimetría, como pueden ver, pasa a profundo muy rápido, pocos metros de costa que son de aguas someras, que sean susceptibles de depositación, o de resuspensión. Una vista en planta del lago, donde las partes más rojas, oscuras, son aquellas que tienen mayor susceptibilidad de resuspensión, porque son aguas más someras que van hasta 8 metros de profundidad no más.

¿Qué provoca la resuspensión? Bueno, pueden ser corrientes o pueden ser olas: en ambos casos, el viento es el principal agente que puede provocar esta resuspensión, y esto provoca - cuando existen vientos pronunciados en una magnitud importante, en una dirección determinada y por un tiempo constante – un momentum, transferencia del momentum desde el viento hasta la superficie del agua, si esa transferencia es lo suficientemente larga en el tiempo, entonces se producen estas olas. Y si estas olas son lo suficientemente grandes, o las aguas, lo suficientemente someras, traspasan esa energía al fondo del lago, con esa velocidad al cuadrado. Y generan una fuerza, que distribuidas en el área es corte, y si el corte es mayor al umbral de corte de las partículas existentes en el fondo… tenemos resuspensión.

Como las olas se mueven “hacia adelante y hacia atrás”, el movimiento neto de la partícula en sí, es cero. La partícula solo se suspende, pero existe un efecto combinado de las corrientes que están dentro del lago y esas corrientes podrían transportar el sedimento hacia otros puntos. Entonces la pregunta es: ¿las corrientes son importantes, las olas son importantes, ambos son importantes para la resuspensión? Y aquí hay unos gráficos que se midieron *in situ* con ADV a 15 – 10 cms del fondo: en la parte superior corte versus días del año y en la parte de abajo lo mismo. Pero la parte de arriba es por olas, la de abajo es por corrientes. La línea punteada quiere decir umbral de resuspensión de una partícula de 150 µm, una arena fina, y pueden ver que los eventos de olas son los únicos que pueden causar resuspensión. Las corrientes no tienen suficiente energía para resuspender partículas de ese tamaño, pero sí tienen suficiente energía para transportar las partículas suspendidas en las olas.

Como nosotros nos queremos enfocar sólo en resuspensión, basta con analizar las olas, por lo tanto, y si suponemos entonces esa eventualidad podemos fijarnos que modelando solamente las olas estamos “ok”. Así que la decisión fue modelemos las olas, porque poner muchos aparatos midiendo en muchas partes del lago sale muy caro (estamos hablando de muchos millones de dólares) y eso es poco factible. Por lo tanto, si nosotros tenemos algunos puntos, simulamos algunas olas, vemos si efectivamente llegan abajo, calculamos los esfuerzos de corte que generan y vemos las partículas que hay y si se pueden resuspender, entonces podemos encontrar focos de resuspensión y podemos validar con el instrumento en algunos puntos del lago para así poder decir que nuestra simulación es válida.

Para eso ocupamos el código STWAVE, código del *US Army Corp of Engineers*, era gratis hasta hace poco tiempo, el problema de este código, que es un código espectral, es que es un código 2D, que simula las olas en 2D y traspasa la energía hacia abajo en la columna, es que está diseñado para costas. Y como estamos hablando de costa, particularmente las costas tienen un régimen turbulento completo y por lo tanto lo que se ocupa para ver la disipación de energía por fricción o para calcular el esfuerzo de corte, es Manning. Y Manning, ustedes lo habrán visto, es turbulento completo, lo que no ocurre en los lagos: los lagos tienen regímenes con dominancia de fuerzas viscosas, más que de inercia, y por lo tanto,

lo que había que hacerle a este código era cambiar el efecto de difusión por fricción, y el cálculo del corte, por lo tanto. Y tuvimos acceso al código fuente, modificamos la parte de fricción, le agregamos una subrutina de cálculo de corte, usando un código de una ecuación que fuera en régimen viscoso.

Esto me imagino que lo han visto mecánicamente en fluidos, tiene que ver con la fuerza de arrastre, que se produce por dos cosas: por el esfuerzo de corte, por presión. La presión ocurre cuando hay diferencias de formas en el fondo, en este caso en el lago no tenemos formas asumimos, así que relegamos todo al esfuerzo de corte, como si fuera solo *drag*, con C_f siendo el coeficiente de fricción, y con la velocidad orbital al cuadrado, que es la velocidad cerca del fondo del lago, que va hacia atrás y adelante producto de las olas, y ese coeficiente de fricción lo podemos calcular ocupando una expresión que tenga que ver con las fuerzas viscosas y no con las de inercia, por lo tanto, alejarnos de Manning y así hacer un cálculo de acuerdo a las condiciones de régimen de flujo que tenemos en el lago.

Si reemplazamos estas expresiones, por supuesto que el código debe ser revalidado: metimos un aparato que mide altura y frecuencia de olas, lo sacamos después de seis meses y se había echado a perder el medidor de presión, así que esos seis meses invertidos no sirvieron. Y dijimos qué hacemos, resulta que hace un par de años atrás habían hecho una campaña con el mismo aparato, cerca de Los Angeles, tenían estación de viento además.

Por lo tanto lo que pudimos hacer, se ve en el grafico A (arriba), velocidad de viento durante días, el segundo, dirección del viento, luego, abajo en línea continua, altura de olas y abajo periodo de olas; en un punto determinado, si no me equivoco, alrededor de unos 5-6 metros de profundidad. Los círculos abiertos son las simulaciones de STWAVE, las que no son dinámicas en el tiempo: por lo tanto, nosotros sacamos fotos en momentos en partículas y eso limita las simulaciones a eventos en los que la magnitud y dirección del viento se mantiene constante por un periodo importante (más de dos horas).

Y eso se puede ver en la validación, en donde las magnitudes no cambian de forma importante ni significativa, entonces STWAVE los sigue bastante bien: por lo tanto, con esto podemos decir que validamos el código, funcionan nuestras nuevas subrutinas de cortes para lagos, lo que hicimos en el lago Tahoe, fue que elegimos un punto que estaba instrumentado y donde se están midiendo las olas hoy en día por eso no puedo mostrar la información, se está midiendo altura y periodo de olas, velocidad de viento, turbiedad y se están sacando muestras de lago para ver la granulometría y eventualmente poder calcular si es que hay resuspensión.

Primera simulación: viento, naturalmente en este sentido, con una magnitud de 19 m/s, olas que se generan en el punto de importancia con una magnitud de 1.8 metros, período de 5 segundos, pero lo más importante que podemos calcular son los esfuerzos de corte, ocupando esta definición que les contaba. Y con esos esfuerzos, tenemos que analizar si es que en los puntos de interés que nosotros tenemos, ellos son superiores al esfuerzo de corte umbral, lo critico que tienen los

sedimentos, para eso ocupamos el famoso diagrama de Shields. En su forma básica, probablemente ustedes lo han visto, donde la curva negra dice este es el tamaño de partícula, y esto tiene que ver con el esfuerzo crítico, el tamaño de partícula representado por el número de Reynolds de partícula, las partículas más finas hacia la izquierda y a la derecha las más grandes. La línea dice que sobre esa línea (es el esfuerzo de corte crítico para cada partícula), existe resuspensión, bajo esa línea no existe resuspensión.

Para validar nuestro modelo entonces con el aparato de la izquierda que es el que mide el CDT, la densidad de la columna de agua a dos metros de profundidad que es más o menos donde tenemos puestos nuestros equipos, con dos metros de profundidad a densidad constante en la vertical, cuando pasa al aire, los cambios de densidad son brutales, así que podemos medir la altura de olas, el aparato c3 que mide ahí mide la turbiedad y podemos relacionar con la altura de ola si es que existe resuspensión o no.

Estos son mediciones en dos puntos, los dos de arriba son Glenbrook, un punto particular en el lago Tahoe (arriba turbiedad, abajo altura de olas), entonces se ve que hay una relación: cuando hay olas altas existe una resuspensión de partículas, y lo mismo en Homewood, que cuando existen olas de cierto tamaño, existe resuspensión. Por lo tanto, tomando todo lo que habíamos hecho en la simulación, nosotros vamos a más puntos: estos son los puntos que tenemos instrumentados, y podemos sacar gráficos como este. Tenemos el esfuerzo de corte de una simulación, tenemos las validaciones de los distintos puntos y sabemos la curva de Shields porque estamos sacando granulometría de los distintos puntos y podemos saber a qué profundidad de agua, con cierto nivel de altura de ola, podemos tener o no resuspensión. Y más aún de qué tamaño de partícula estamos hablando, cuando podemos tener resuspensión.

Pero más interesante que esto es llegar solamente a la información meteorológica, y solamente con la velocidad y dirección del viento, podemos nosotros saber si en cierto punto en particular nosotros tenemos resuspensión o no, y que tamaño de partícula tendremos en resuspensión. Es muy interesante para la gente que está estudiando el lago Tahoe, para aislar los eventos de resuspensión, de eutrofización que han tenidos, y para sacar todos los otros efectos que están tratando de eliminar para mantener la claridad del lago.

Otro punto importante es que la parte en que estaba yo en California, particularmente está en la misma latitud que estamos nosotros, de hecho hay una ciudad que se llama Sausalito, igual que en este país, son ciudades hermanas, y por tanto, tenemos los mismos beneficios y las mismas desgracias. Sequías importantes, los lagos están bajando su nivel de manera importante, y el Tahoe no es la excepción. Como pueden ver, los contours de zonas en kilómetros cuadrados, en los que potencialmente podría haber resuspensión con una baja del nivel del lago. Y eso es lo que se ve ahí en kilómetros cuadrados, con una partícula en particular, debido al tamaño de esta: bajo cierto nivel o sobre, podríamos tener resuspensión y calcular en que pintos podría ser. Tenemos pensado más adelante

poner otros aparatos que nos permitan medir corte y poder medir ópticamente las partículas en suspensión y el movimiento de partículas y de esa forma validar no solamente la resuspensión si no el movimiento de partículas y el transporte de partículas.

Acá en Chile es aplicable por supuesto en el Lago Llanquihue, un lago que ha tenido problemas con resuspensión y eutrofización entre varios otros, lagos que tienen acumulación o trazas de contaminantes, o de metales como los que salen ahí, también pueden tener problemas de resuspensión por los vientos.

Y otra cosa interesante que se puede hacer en estos lagos, como el lago Tahoe donde hay actividades deportivas y náuticas con jet ski, barcos, veleros, …ellos también generan olas, que son importantes y uno podría simular con viento esas olas, que son equivalentes a las olas que generan estos equipos y ver si se produce resuspensión o no, en zonas que son suficientemente someras y que tienen disponibilidad de partículas de cierto tamaño, que pueden ser resuspendidas y que tiene suficientes nutrientes que pueden ser suspendidos. Tal vez cancelas esas zonas para deportes náuticos y desplazarlas a otros puntos. Algunas de las cosas que se pueden hacer con este tipo de herramientas, y con eso me retiro.

Preguntas

Muy buena presentación, mi pregunta es: suponiendo que la turbiedad esta causada por sedimentos, ¿entonces qué porcentaje de sedimentos es por actividad biológica, es decir, algas, fósforos…?

Bueno, este es un lago particularmente es oligotrófico, es muy claro, la mayoría de la resuspensión se produce por sedimentos y en el caso que tengas algas, son eventos puntuales que se generan producto de la resuspensión de los sedimentos que tienen acumulados nutrientes, entonces es vistoso ese verde. El lago es súper claro.

Patricio, muy interesante la presentación, pero junto con la resuspensión ocurre la sedimentación del material, parte de ello, me imagino es transportado hidrodinámicamente aguas abajo, y parte se sedimenta. En este caso, más o menos, ¿saben que proporción es transportado…?

Es la segunda fase de este proyecto. A través de las mediciones de turbiedad y todo esto, desaparece la turbiedad, rápidamente después de que los eventos de olas no están. Y no sabemos si es porque las corrientes no son lo suficientemente fuertes para mover las partículas y por lo tanto el movimiento de hacia atrás y hacia delante de las olas lo que hace es resuspender, y cuando bajan las olas solamente cae, o efectivamente lo llevan hacia mayores profundidades, y eso lo tenemos que analizar. Existen partículas de muy pequeño tamaño, muy chiquititas, y eso las hemos encontrados, pero es una de las cosas que queremos ver: cuánto transporte existe efectivamente, y en qué zonas del lago Tahoe.

Patricio, tu mencionaste al final de la presentación el efecto de las embarcaciones o cosas que producen jets o turbulencia locales ¿Habían en el lago Tahoe lugares de este tipo, como para poder monitorear esto?

Si, habían zonas que son históricamente turísticas y que están destinadas a este movimiento de veleros, de naves, de lanchas, de transporte marítimo y recreación que genera olas, más que turbulencia. Y esas olas se mueven en zonas someras, pudiendo generar resuspensión.

Claro, porque ahí es precisamente, cuando llegan a la orilla llegan a zonas bajas, y las hélices producen efectos bastantes profundos: en los puertos se ve eso.

Pero se han puesto un par de huellas que se mueven para medir la cinética del movimiento, y se cree que tiene que ver con las embarcaciones un poquito más grande que generan cierto tamaño de olas, o que se produce resonancia entre varios equipos, generan olas que se van moviendo y van aumentando, generando la resuspensión.

Hola, yo no sé si el lago se estratifica térmicamente y ahí se rompe esa estratificación y ahí se producen eventos de resuspensión hidrodinámica debido solamente a la temperatura.

Hay estratificación pero en la zona más profunda, pero como es más profunda, pasa de los 300 metros como si nada, la estratificación tiene algún efecto, pero no es el efecto más importante de resuspensión. Así que no es el tema en el que estemos enfocado en este minuto, pero tenemos unos termómetros a 500 metros para ver la estratificación en invierno y en verano.