

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN DE LA INUNDACIÓN POST INCENDIO EN EL ESTERO
MARGA-MARGA.**

SANDRA MUÑOZ.¹
SEBASTIÁN NASH.²
CRISTIAN ESCAURIAZA.³

RESUMEN

Los incendios forestales generan cambios en las propiedades del suelo que alteran los procesos hidrológicos y aumentan la escorrentía y la producción de sedimentos. En este trabajo se modela el impacto de un incendio ocurrido en la cuenca del estero Marga-Marga sobre la amenaza de inundación, utilizando el modelo WEPPcloud para simular la generación de sedimentos en siete subcuencas bajo escenarios con y sin incendio. Los resultados se integran a un modelo numérico basado en las ecuaciones de Saint Venant, para evaluar la propagación de la inundación y su relación con el volumen de sedimentos transportado. Se observan diferencias en el caudal peak y en la extensión del área inundada entre ambos escenarios, evidenciando un aumento del nivel de amenaza post-incendio. El trabajo propone como desarrollo futuro acoplar las concentraciones de sedimentos con el modelo hidráulico, con el fin de mejorar la representación del riesgo en eventos extremos.

¹ Estudiante de Magister, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica - email: smunozal@estudiante.uc.cl

² Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica - email: snash@uc.cl

³ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica – email: cescauri@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

Durante este último tiempo ha habido una creciente incertidumbre climática en Chile, debido a fenómenos meteorológicos extremos como aumento de las temperaturas en verano y lluvias extremas en el invierno (World Meteorological Organization, 2024), desencadenando en lo que se conoce como eventos en cascada, es decir, “una secuencia de eventos en los que cada uno produce las circunstancias necesarias para el inicio del siguiente” (Allaby, 1994). Uno de los lugares afectados por estos fenómenos es la cuenca del estero Marga-Marga, donde pueden generarse estos eventos. Incendios de gran magnitud, seguidos de lluvias extremas, podrían provocar un aumento en la producción y transporte de sedimentos. (East et al., 2024).

Estudios han mostrado que, los incendios pueden alterar las condiciones del suelo, las características hidrológicas de la cuenca o el proceso de transporte de sedimentos, aumentando su carga posterior al incendio (Ebel & Moody, 2017; Moody et al., 2013; Smith et al., 2011; Spigel & Robichaud, 2007). También, se ha expuesto en otras investigaciones que la producción de sedimentos y la erosión incrementa posterior a un incendio (Cerdà & Lasanta, 2005). Por lo tanto, la erosión post-incendio es un factor clave a considerar porque pone en riesgo los suministros de agua, las infraestructuras y a las comunidades que se ven potencialmente afectada por el incremento de los incendios forestales (East et al., 2024), debido a la generación de sedimentos y el impacto de esto en eventos de inundación (East et al., 2021).

Es por lo anterior que, un factor clave a considerar en la huella que dejan los incendios en los procesos de inundación, es la cuantificación del nivel de amenaza. Esta se entiende como una magnitud y probabilidad de ocurrencia de un evento en específico y en una determinada área y tiempo, lo que significa una consecuencias negativas derivada del evento debido a daños físicos, sociales, económicos y ambientales (M. Jibhakate et al., 2023)

En Chile, el impacto de los incendios no ha sido abarcado en estudios que se hayan realizado en la cuenca del estero Marga-Marga, por lo que hay una escasa comprensión de los procesos y magnitud de la movilización de sedimentos después de un incendio y en combinación con eventos de lluvias extremas. Esto se vuelve crítico al considerar que los incendios forestales alteran las propiedades del suelo, reduciendo su infiltración y aumentando la escorrentía superficial, elevando el nivel de amenaza para la población y la infraestructura aguas abajo.

Con lo anterior, en este estudio se evalúa la respuesta de la cuenca del estero Marga-Marga tras la ocurrencia del incendio forestal del 2 y 3 de febrero del 2024, para determinar cómo la amenaza de ocurrencia de eventos de inundación, que suceden posterior a un incendio forestal, se ve modificada debido al arrastre de sedimentos sueltos generados por el fuego, originando una mayor exposición a la propagación de la inundación durante lluvias extremas y provocando un mayor nivel de amenaza.

La presente investigación se centra en siete subcuencas que conforman las zonas más afectadas por el incendio, con el objetivo de determinar el efecto de la producción de sedimentos en los eventos de inundación, y cómo esta amenaza puede verse modificada. Para ello, se utiliza la herramienta WEPPcloud, la cual permite cuantificar la producción de sedimentos en una simulación que abarca cinco años. Finalmente, se aplica un modelo

numérico basado en las ecuaciones de Saint Venant para determinar la propagación de inundaciones, considerando precipitaciones con distintos periodos de retorno y los efectos de la producción de sedimentos en la escorrentía producida por los eventos de tormenta.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de interés se ubica en la cuenca del estero Marga-Marga, en la región de Valparaíso. Su clima se clasifica como mediterráneo con un clima templado y con precipitaciones principalmente en los meses de invierno (Barría-Herrera et al., 2021), alcanzando una temperatura media de $14.8 \pm 1.3^\circ\text{C}$ y precipitación media anual de 190 mm (Naya et al., 2011). La cuenta tiene una superficie aproximada de 424 km² y alcanza una cota máxima de 1.336 m.s.n.m (Ministerio de Obras Públicas, 2014).

El incendio que se generó entre el 2 y 3 de febrero del 2024, afecto a Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué y Villa Alemana, en la Región de Valparaíso (Martínez et al., 2024). Las cifras oficiales, de acuerdo con el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), indican que 11.349,3 ha fueron quemadas, de las cuales 427,78 ha corresponden a zonas urbanas y 10.921,42 ha a zonas rurales. En cuanto a cobertura terrestre, el 53% del área quemada representa a bosque-forestal, mientras que el 39% del área total afectada corresponde a pastizal-arbustivo (Martínez et al., 2024), por lo que en gran parte de la cuenca del estero Marga-Marga el índice de severidad del incendio fue entre moderado y alto (Figura 1). Con lo anterior, fueron 7 subcuencas las que se identificaron mayormente quemadas, de acuerdo con las diferentes clases de la severidad del incendio (Figura 2).

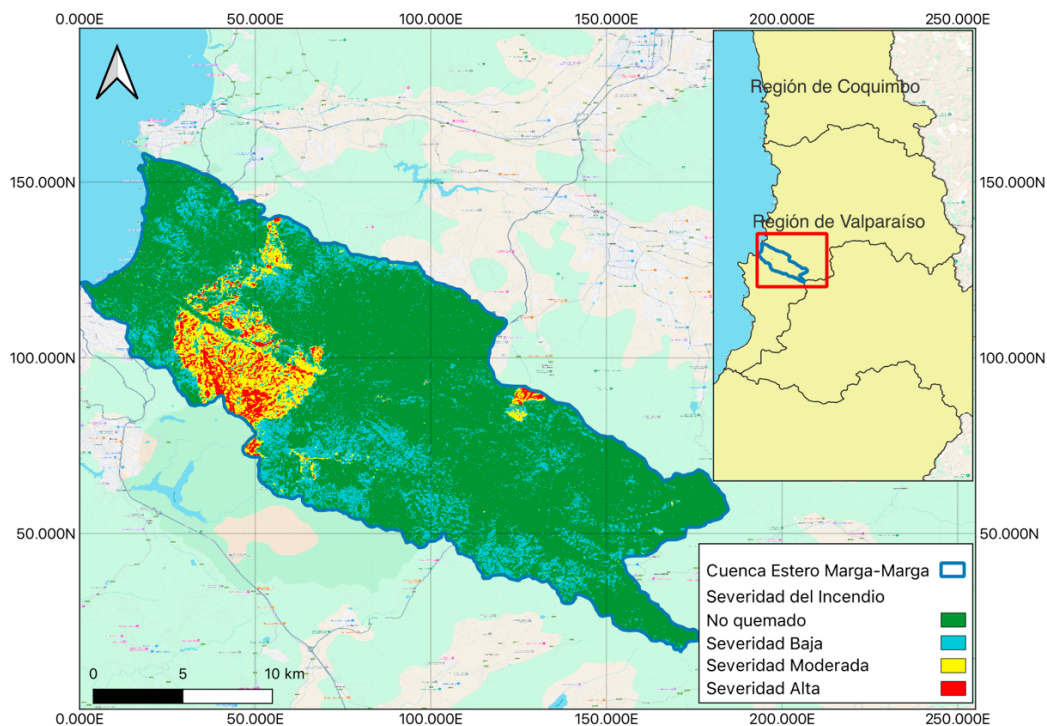


Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio.

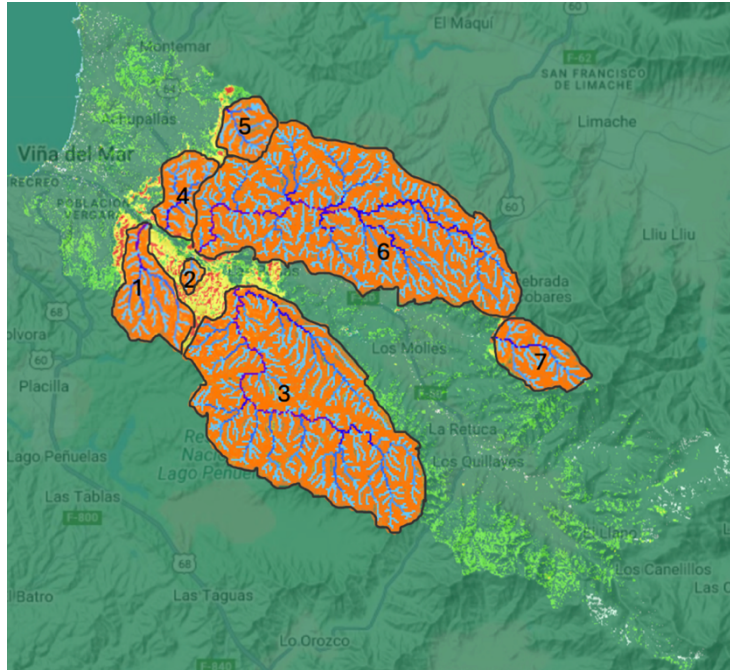


Figura 2: Subcuencas afectadas delineadas en negro, foco principal del estudio.

3. METODOLOGÍA

3.1 Uso del modelo WEPPcloud

Para estimar la cantidad de sedimentos producidos se utiliza un modelo denominado WEPP (Water Erosion Prediction Project), diseñado para simular la escorrentía post incendio y la movilización de sedimentos, simulando procesos físicos de la erosión hídrica del suelo, incluyendo infiltración, escorrentía, transporte de sedimentos, entre otros (Flanagan & Nearing, 1995). Este modelo cuenta con una interfaz en línea WEPPcloud (Lew et al., 2022), por lo que dada su accesibilidad y facilidad de uso, se optó por emplear esta herramienta para modelar la producción de sedimentos post-incendio en el área de estudio.

La versión en línea utiliza parámetros de suelo y clima correspondientes a base de datos de Estados Unidos, por lo que para adaptarlo a las condiciones geográficas de Viña del Mar, se empleó un mapa de uso y tipo de suelo, junto con un archivo climático CLIGEN desarrollado a partir de un registro de datos diario de precipitación y temperatura que va entre 1979 y 2011. Para incorporar los efectos del incendio, se utilizó un mapa de severidad del incendio obtenido mediante un código de Google Earth Engine, disponible en el Portal de Conocimientos UN-SPIDER de la Oficina de Asuntos del Espacio Ultraterrestre de las Naciones Unidas. Este mapa cuenta con cuatro clases de acuerdo con la severidad; no quemado, severidad baja, media y alta, donde sus niveles se obtienen calculando el índice dNBR, propuesto por USGS. En la siguiente tabla se muestran los rangos a utilizar.

Tabla 1: Niveles de severidad, propuesto por USGS (Keeley, 2009).

Nivel de severidad	Rango dNBR (en escala de 10^3)
No quemado	-100 a +99
Severidad baja	+100 a +269
Severidad media	+270 a +659
Severidad alta	+660 a +1300

El modelo se ejecutó en siete subcuencas ubicadas en las zonas más afectadas por el incendio. En cada una de ellas se simularon 50 años bajo dos escenarios: uno que incluyó el mapa de severidad del incendio, con el fin de evaluar su impacto sobre la producción de sedimentos, y otro sin dicha información, para representar condiciones sin la influencia del incendio.

Para obtener resultados de producción de sedimentos con mayor precisión, WEPPcloud permite modificar parámetros como el esfuerzo de corte crítico (N/m^2), basado en el tamaño medio de las partículas en el lecho del canal (mm), y la erodibilidad del canal (k_{rb}) (s/m). Este último, puede ser calibrado dependiendo de la fracción de arena que contenga el suelo (Guo et al., 2021), tal como se muestra a continuación.

$$k_{rb} = 0,00197 + 0,03vfs + 0,03863e^{-1840orgmat} \quad \text{Si \%arena} > 30\% \quad (1)$$

$$k_{rb} = 0,0069 + 0,134e^{-20clay} \quad \text{Si \%arena} \leq 30\% \quad (2),$$

donde, vfs , $orgma$ y $clay$ representan la fracción de suelo superficial de arena muy fina, materia orgánica y contenido de arcilla, respectivamente.

Con lo anterior, WEPP genera resultados de producción de sedimentos como sedimento exportado en el punto de salida de la subcuenca, que es una combinación de erosión de laderas y canales, reflejando el sedimento transportado en un día (East et al., 2024). Adicionalmente, WEPP entrega información del volumen de agua y caudal peak líquido que escurre al punto de salida de la cuenca.

3.2 Modelo de propagación de inundación

Para simular la propagación del flujo, se emplearon las ecuaciones de Saint Venant para describir la dinámica del flujo, que se expresan en forma diferencial como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh \frac{k^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \cdot u \quad (4)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - gh \frac{k^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \cdot v \quad (5)$$

Donde h es la profundidad, u y v son las velocidades promedio del flujo en la profundidad en las direcciones Cartesianas \hat{x} e \hat{y} , respectivamente. El tiempo se representa por t , z_b es la elevación del lecho, g es la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y k corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning.

Para determinar el coeficiente de Manning se utilizó un mapa de uso de suelo extraído de MapBiomass Chile. A cada clase que conforma este mapa, se le asigna un valor de Manning, dependiendo del tipo de superficie, que para este caso se clasifican en bosque, pasto, arena/playa, infraestructura y matorral.

Finalmente, para incorporar los efectos de los incendios en los modelos de inundación, se determinó una concentración de sedimentos diaria para cada una de las subcuencas, de acuerdo con el periodo simulado en WEPP, tal como se muestra a continuación.

$$C_i = \frac{S_{y_i}/\rho_s}{V_{mezcla_i}} \quad (6),$$

donde, S_{y_i} corresponde a la producción de sedimentos diaria (kg), ρ_s es la densidad aparente del sólido (kg/m^3) y V_{mezcla_i} es el volumen de agua más volumen de sólido diario. Con esto, se estimó una concentración total ponderada que representa a la totalidad de las subcuencas.

$$C_{total} = \frac{\sum C_i \cdot Q_i}{\sum Q_{mezcla_i}} \quad (7),$$

donde, C_i corresponde a la concentración diaria descrita anteriormente, Q_i es el caudal diario y Q_{mezcla_i} es el caudal de la mezcla. Cabe destacar que este mismo mecanismo se utilizó para un escenario sin incendio, con el fin de evaluar la amenaza de inundación en ambos escenarios.

Finalmente, para llevar a cabo el modelo de inundación, se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el tamaño de celda adecuado para las simulaciones, donde se logró definir un $\Delta x, \Delta y$ de 5m. También, se utilizó un CFL igual a 0,8. La condición de borde aguas arriba corresponde a un hidrograma asociado a un periodo de retorno, mientras que aguas abajo se define como una salida libre. La topografía corresponde a un DEM de resolución 5m para zona de la ciudad y 1m para el canal.

3.3 Evaluación de riesgo de amenaza

La evaluación del riesgo se puede cuantificar teniendo en cuenta las cargas hidrostáticas y dinámicas, con lo que la máxima fuerza D , se estima como (Ferrari et al., 2019)

$$D = h\sqrt{1 + 2Fr^2} \quad (8)$$

$$Fr = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\sqrt{gh}} \quad (9),$$

donde h corresponde a la profundidad del agua y Fr es el número de Froude. Las categorías que definen el nivel de amenaza son: bajo ($0 \leq D < 0,5$), medio ($0,5 \leq D < 1$), alto ($1 \leq D < 1,5$) y muy alto ($D \geq 1,5$), como se muestra a continuación.

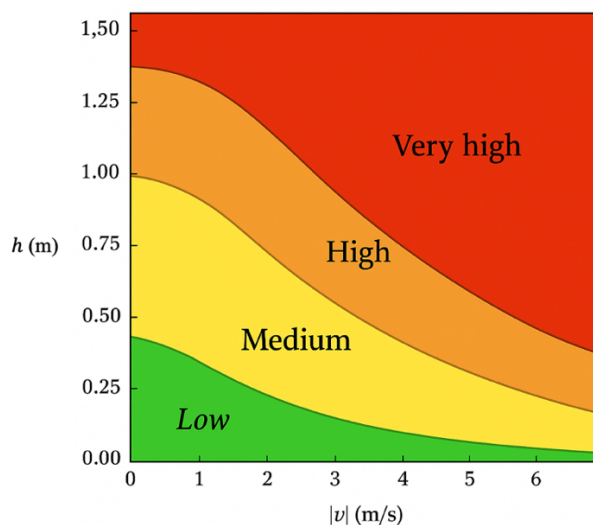


Figura 3: Diagrama h - $|v|$ mostrando las categorías de amenaza relacionadas con la fuerza total máxima D . (Ferrari et al., 2019)

4. RESULTADOS

4.1 Resultados modelo WEPP

Los resultados de WEPPcloud predijeron, mayor producción de sedimentos en el escenario con incendio que sin incendio. Considerando la contribución de todas las subcuencas, se obtuvo un promedio anual total de 117.940 t/año de sedimentos con incendio, mientras que sin incendio fueron 48.930 t/año, lo que se traduce en un 141% de aumento en la producción total de sedimentos tras el siniestro.

En cuanto a los resultados por subcuenca, se puede observar, para ambos escenarios, la producción de sedimentos, volumen de sedimentos y concentración volumétrica de sedimentos, a lo largo de los 50 años simulados. De esto, se ve que la máxima concentración alcanzada es del orden del 26%, lo cual se asocia a uno de los días con mayor producción de sedimentos, alcanzando 200.000 ton, aproximadamente.

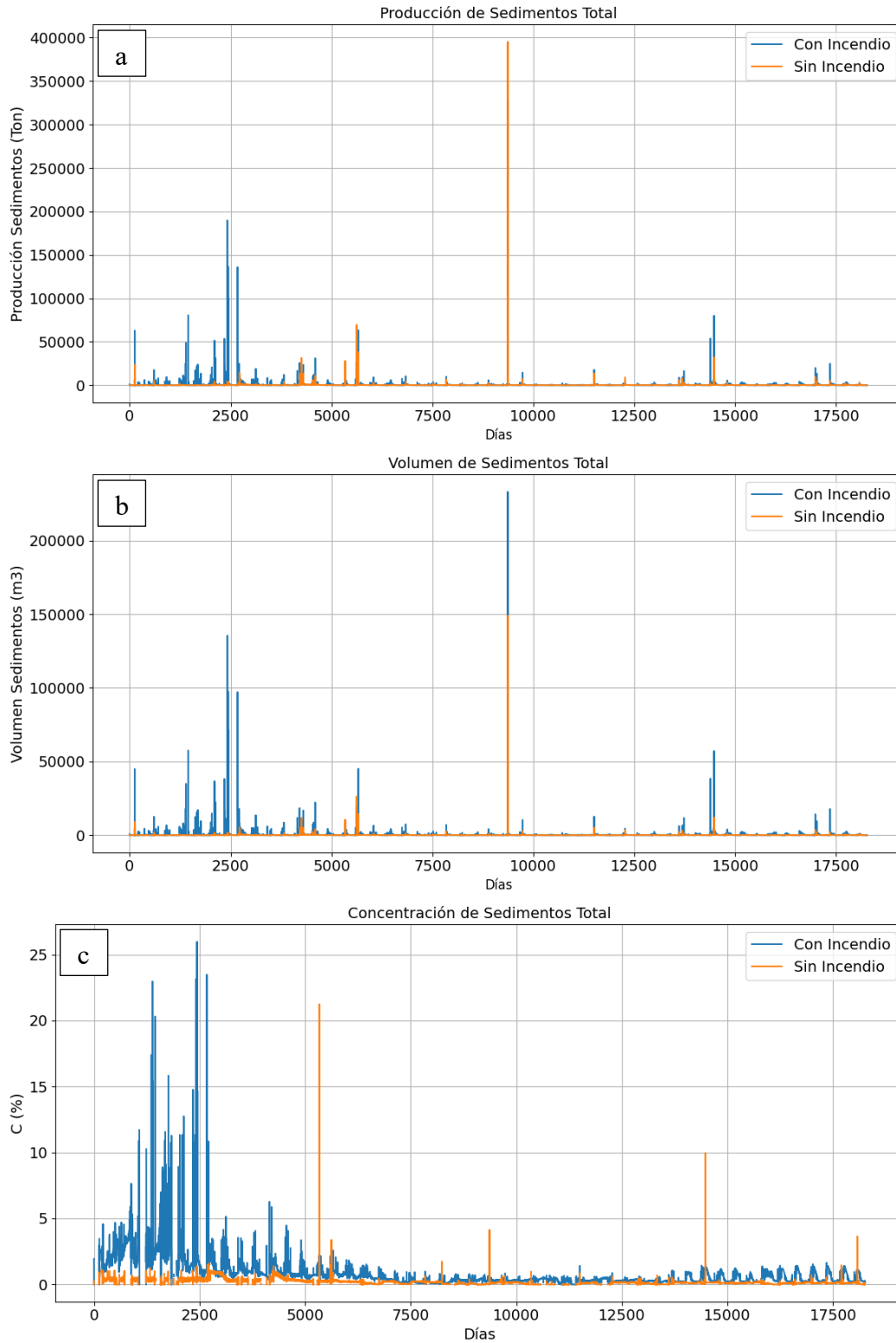


Figura 4: Resultados modelo WEPPcloud para ambos escenarios simulados durante el periodo establecido de 50 años; (a):Producción de sedimentos total, (b): volumen de sedimentos, (c): concentración de sedimentos.

5.1 Resultado modelo de inundación

De acuerdo con estudios hidrológicos realizados previamente en la cuenca del estero Marga-Marga, se obtuvieron hidrogramas para distintos periodos de retorno. Con esto, se observó que, la mayor producción de sedimento para un escenario con incendio tiene un caudal peak asociado de aproximadamente $600 \text{ m}^3/\text{s}$ y sin incendio de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que se condice con una lluvia de periodo de retorno 50 años y 25 años, respectivamente, en relación con el estudio mencionado anteriormente. Lo anterior, lleva a tener propagación de inundación alcanzando alturas máximas entre 1m y 5m para.

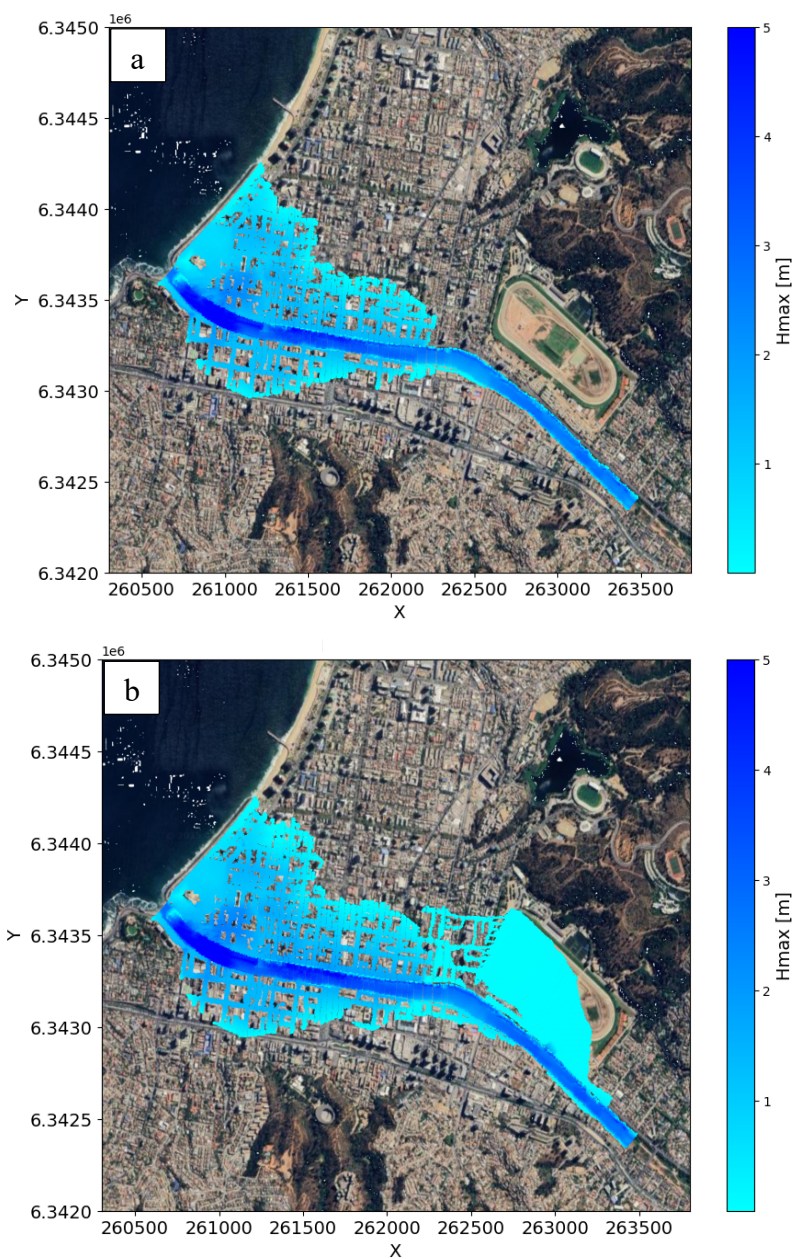


Figura 5: Atura máxima de agua en inundación; (a): asociado al caudal del escenario sin incendio (T25), (b): asociado al caudal del escenario con incendio (T50).

4.3 Resultados evaluación de riesgo de amenaza

En relación con las alturas máximas expuestas en el apartado anterior, se identificaron los distintos rangos de amenaza (Figura 6) tanto para el caudal peak para el escenario sin incendio (Q50), como el escenario con incendio (Q75).

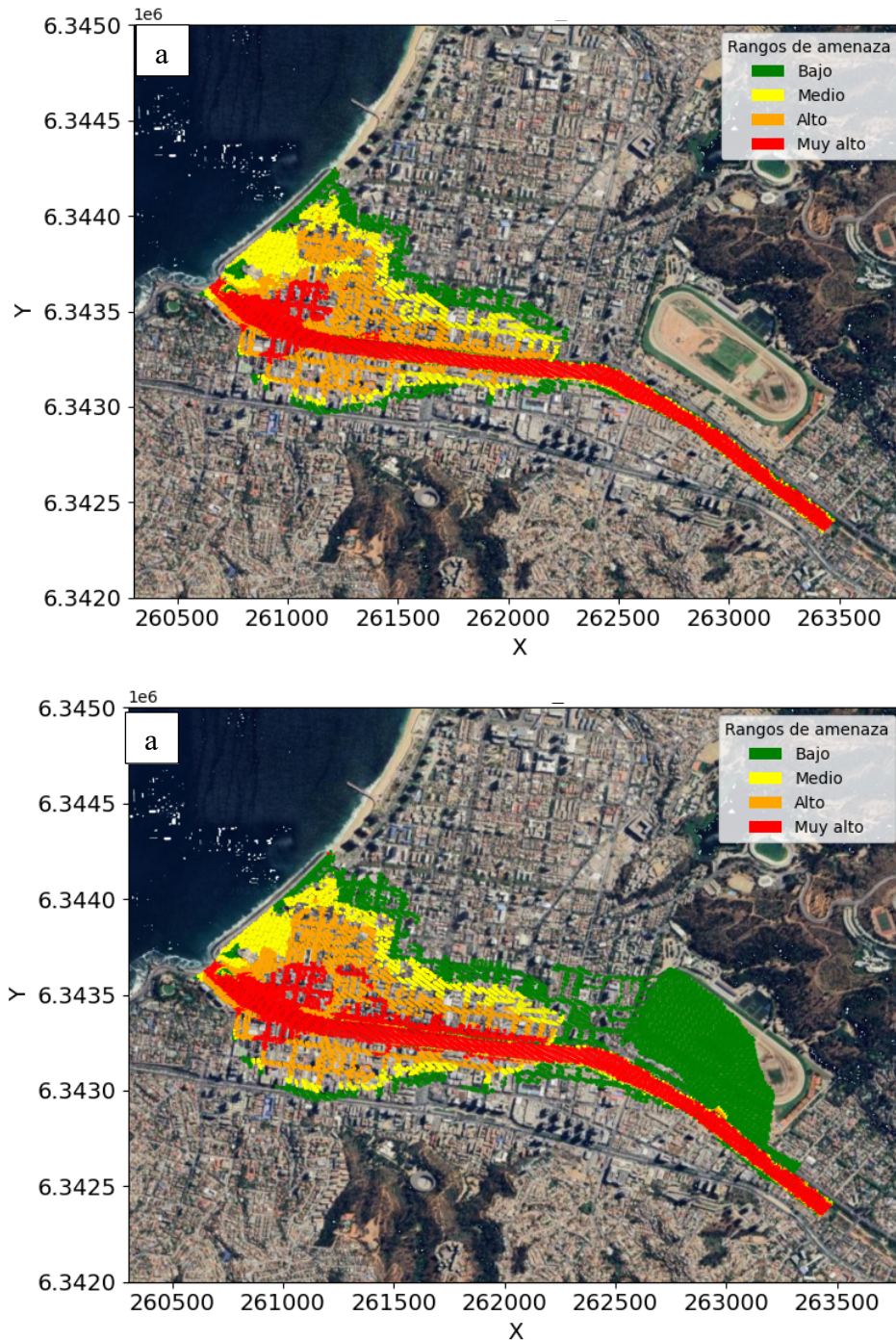


Figura 6: Rangos del nivel de amenaza; (a): asociado al caudal del escenario sin incendio (T25), (b): asociado al caudal del escenario con incendio (T50).

5. DISCUSION

Los resultados obtenidos demuestran que el incendio forestal ocurrido en febrero de 2024 tuvo un impacto en la producción de sedimentos. La simulación con WEPPcloud reflejó un 141% de aumento en la producción total de sedimentos tras el siniestro. Esta mayor disponibilidad de sedimentos contribuye a modificar la escorrentía y aumenta la probabilidad de desbordamiento, lo que se evidenció en el modelo hidráulico a través de una mayor extensión de la zona inundada bajo condiciones post-incendio. El caudal peak asociado también fue superior, lo que respalda la hipótesis de que la combinación de incendios y lluvias intensas intensifica el riesgo de inundaciones.

La propagación de inundación, que se relacionó con el nivel de amenaza mostró que dentro del canal predomina una amenaza muy alta, atribuida a las mayores velocidades y profundidades que incrementan la fuerza del flujo. mientras que, en las zonas aledañas al canal, especialmente en áreas urbanas o planas, se identificó un rango de amenaza medio como el más recurrente. Esta diferenciación resalta el efecto del incendio en ampliar las zonas afectadas y redistribuir la intensidad del peligro más allá del cauce principal.

Como proyección a futuro, resulta fundamental acoplar el modelo de inundación con las concentraciones de sedimentos obtenidas a partir del volumen total transportado. Esto permitiría una evaluación más realista del efecto de los sedimentos en el comportamiento hidráulico del flujo y la amenaza resultante, contribuyendo al diseño de estrategias de gestión del riesgo post-incendio en cuencas urbanas.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por el Centro de Investigación CIGIDEN, proyecto ANID/Fondap 2023 1523A0009.

7. REFERENCIAS

- Allaby, M. (Ed.). (1994). *The concise Oxford dictionary of ecology* (Vol. 415). Oxford University Press Oxford.
- Barría-Herrera, J., Vergara-Cortés, H., Contreras-López, M., & Rangel-Buitrago, N. (2021). A seasonal comparison of litter impacts along the Viña del Mar - Concón coastal strip, Valparaiso region of Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112854>
- Cerdà, A., & Lasanta, T. (2005). Long-term erosional responses after fire in the Central Spanish Pyrenees: 1. Water and sediment yield. *Catena*, 60(1), 59–80. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2004.09.006>
- East, A. E., Logan, J. B., Dartnell, P., Lieber-Kotz, O., Cavagnaro, D. B., McCoy, S. W., & Lindsay, D. N. (2021). Watershed Sediment Yield Following the 2018 Carr Fire, Whiskeytown National Recreation Area, Northern California. *Earth and Space Science*, 8(9). <https://doi.org/10.1029/2021EA001828>
- East, A. E., Logan, J. B., Dow, H. W., Smith, D. P., Iampietro, P., Warrick, J. A., Lorenson, T. D., Hallas, L., & Kozlowicz, B. (2024). Post-Fire Sediment Yield From a Central

- California Watershed: Field Measurements and Validation of the WEPP Model. *Earth and Space Science*, 11(7). <https://doi.org/10.1029/2024EA003575>
- Ebel, B. A., & Moody, J. A. (2017). Synthesis of soil-hydraulic properties and infiltration timescales in wildfire-affected soils. *Hydrological Processes*, 31(2), 324–340. <https://doi.org/10.1002/hyp.10998>
- Ferrari, A., Viero, D. P., Vacondio, R., Defina, A., & Mignosa, P. (2019). Flood inundation modeling in urbanized areas: A mesh-independent porosity approach with anisotropic friction. *Advances in Water Resources*, 125, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.01.010>
- Flanagan, D. C., & Nearing, M. A. (1995). *USDA-WATER EROSION PREDICTION PROJECT HILLSLOPE PROFILE AND WATERSHED MODEL DOCUMENTATION*.
- Guo, T., Srivastava, A., & Flanagan, D. C. (2021). Improving and calibrating channel erosion simulation in the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. *Journal of Environmental Management*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112616>
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Lew, R., Dobre, M., Srivastava, A., Brooks, E. S., Elliot, W. J., Robichaud, P. R., & Flanagan, D. C. (2022). WEPPcloud: An online watershed-scale hydrologic modeling tool. Part I. Model description. *Journal of Hydrology*, 608. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127603>
- M. Jibhakate, S., V. Timbadiya, P., & L. Patel, P. (2023). Multiparameter flood hazard, socioeconomic vulnerability and flood risk assessment for densely populated coastal city. *Journal of Environmental Management*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118405>
- Martínez, C., León, J., Qüense, J., Román, R., González, L., Bonet, M., Guerrero, N., Romero, C., Araya, E., Acevedo, R., & López, P. (2024). *Informe de daños, Incendios 02 y 03 de febrero de 2024, Viña del Mar (Región de Valparaíso). Fase de Rehabilitación y Reconstrucción*.
- Ministerio de Obras Públicas. (2014). *Inventario de cuencas, subcuencas y subsubcuencas de Chile*.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. En *Earth-Science Reviews* (Vol. 122, pp. 10–37). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.004>
- Naya, D. E., Catalán, T., Artacho, P., Gaitán-Espitia, J. D., & Nespolo, R. F. (2011). *Exploring the functional association between physiological plasticity, climatic variability, and geographical latitude: lessons from land snails*.
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N. J., & Bren, L. J. (2011). Wildfire and salvage harvesting effects on runoff generation and sediment exports from radiata pine and eucalypt forest catchments, south-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.009>
- Spigel, K. M., & Robichaud, P. R. (2007). First-year post-fire erosion rates in Bitterroot National Forest, Montana. *Hydrological Processes*, 21(8), 998–1005. <https://doi.org/10.1002/hyp.6295>