



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Magister en Ciencias Regionales

**Amenaza de inundación repentina basado en
predicciones climáticas sobre la Zona Costera del
Centro-Sur de Chile (ZCCSC): Implicancias en riesgos
socio-naturales.**



Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias Regionales

ANDREAW STHEVEN RIFO PEREIRA

CONCEPCIÓN-CHILE
abril-2023



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales
Programa de Magister en Ciencias Regionales

**Amenaza de inundación repentina basado en
predicciones climáticas sobre la Zona Costera del
Centro-Sur de Chile (ZCCSC): Implicancias en riesgos
socio-naturales.**



Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias Regionales

ANDREAW STHEVEN RIFO PEREIRA

Profesor Guía: Dr. Alfonso Fernández Rivera
Dpto. de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción

Profesora Co-Guía: Dra. Edilia Jaque Castillo
Dpto. de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Universidad de Concepción

CONCEPCIÓN-CHILE
abril-2023





©2023, Andreaw Rifo Pereira

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



Dedicado a mi amada familia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente la orientación del profesor Alfonso Fernández quien me brindó múltiples oportunidades para crecer académica y personalmente en estos últimos años. A la profesora Edilia Jaque por su apoyo durante toda la etapa de estudio en este programa. Al *Hydrology Group, School of Geographical Sciences, University of Bristol* por facilitar el acceso al modelo hidrodinámico 2D LISFLOOD-FP y por recibirme amablemente durante la pasantía efectuada a su departamento. A *Mountain GeoScience Group* de la Universidad de Concepción por desarrollar y proveer el *Dynamical Downscaling WRF-CESM* en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universidad Católica de Valparaíso y el *Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa*. Agradezco también, el financiamiento provisto por el proyecto FONDEF-IDEA 17I10087 de ANID.



Finalmente, agradecer a todas las personas que formaron parte de esta etapa, familia, amigos, profesores, colegas y compañeros.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	vi
TABLA DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	ix
RESUMEN.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes generales, motivación y relevancia.....	1
1.2 Hipótesis.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1. Objetivo General.....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Área de estudio.....	9
2. METODOLOGÍA.....	12
2.1. Descripción evento de julio 2006.....	12
2.2. Implementación del Modelo Hidrodinámico LISFLOOD-FP.....	13
2.3. Forzamiento hidrometeorológico para LISFLOOD-FP.....	18
2.4. Validación modelo de inundación 2006.....	22
2.5. Simulaciones para mediados y finales del siglo XXI.....	27
3. RESULTADOS.....	30
3.1. Resultados del análisis estadístico de los datos históricos.....	30
3.2. Validación del modelo con respecto a Water Index (WI).....	35
3.3. Índices de Rendimiento.....	43
3.4. Comparación con los registros ciudadanos.....	44
3.5. Simulaciones con precipitaciones futuras procedentes de WRF-CESM....	51
4. DISCUSIÓN.....	58
5. CONCLUSIONES.....	65
6. REFERENCIAS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 <i>PRECIPITACIÓN ACUMULADA PARA LA ESTACIÓN DE ANDALIÉN EN EL EVENTO METEOROLÓGICO DE JULIO DE 2006.</i>	13
TABLA 2 <i>ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL ÁREA DE ESTUDIO</i>	19
TABLA 3 <i>RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA SELECCIÓN DE LA MEJOR DISTRIBUCIÓN PARA CADA RXDAY ASOCIADOS AL EVENTO DE JULIO 2006.</i>	32
TABLA 4 <i>PORCENTAJES DE EXCEDENCIA PARA CADA RXDAY EN LOS PERCENTILES 90, 95 Y 99.</i>	33
TABLA 5 <i>EXCEDENCIA DE ACUERDO CON LAS DISTRIBUCIONES CALCULADAS PARA LOS REGISTROS DE LA ESTACIÓN ANDALIÉN DURANTE EL EVENTO DE JULIO 2006.</i>	35
TABLA 6 <i>ÍNDICES DE SIMILITUD, PARA EL CUADRANTE SW DEL DOMINIO ESPACIAL, USANDO DIFERENTES DEMs RESPECTO DEL RESULTADO DE WI.</i>	43
TABLA 7 <i>ALTURA DE AGUA DURANTE LA INUNDACIÓN DE 2006 ESTIMADA A PARTIR DE REGISTROS CIUDADANOS Y COMPARADO CON LA ALTURA MÁXIMA DE AGUA DERIVADA DE LOS MODELOS LFP IMPLEMENTADOS UTILIZANDO DIFERENTES DEMs.</i>	50
TABLA 8 <i>EVENTOS FUTUROS IDENTIFICADOS DESDE WRF-CESM.</i>	52
TABLA 9 <i>COMPARACIÓN DE EVENTOS FUTURO RESPECTO DEL EVENTO DE REFERENCIA (DE JULIO 2006).</i>	55
TABLA 10 <i>PORCENTAJES DE ÁREAS INUNDADA PARA CADA EVENTO DE FUTURO</i>	55



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURA 1 DOMINIO ESPACIAL CON IMAGEN AÉREA (MINVU, 2013) COMO FONDO. TAMBIÉN MUESTRA EL CURSO PRINCIPAL DEL RÍO ANDALIÉN Y LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.....	11
FIGURA 2 DIAGRAMA CONCEPTUAL DE (A) EL MODELO BASE DE LISFLOOD-FP, (B) EL MODELO DE CANALES SUB-GRID Y (C) LA SECCIÓN SUB-GRID. FUENTE: (NEAL ET AL., 2012)	17
FIGURA 3 PRECIPITACIÓN (LÍNEA GRIS) Y CAUDAL (LÍNEA NEGRA) REGISTRADO PARA JULIO EN EVENTO DE 2006.	22
FIGURA 4 RELACIÓN LINEAL ENTRE DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES CARRIEL SUR Y ANDALIÉN (PERIODO 2001-2018).....	31
FIGURA 5 COMPARACIÓN ENTRE SERIE DERIVADAS DE DATOS ORIGINALES (LÍNEA NEGRA) Y MODELO LINEAL (LÍNEA SEGMENTADA) PARA LA ESTACIÓN ANDALIÉN DURANTE EVENTO DE JULIO 2006.	31
FIGURA 6 PDF Y MEJOR DISTRIBUCIÓN., DE ARRIBA A ABAJO, PARA RX1DAY, RX2DAY Y RX5DAY, RESPECT.	34
FIGURA 7 COMPARACIÓN ENTRE WI Y SIMULACIONES CON LFP MODEL USANDO DIFERENTES DEMs A) ASTER GDEM Y B) LIDAR MINVU (2013). EN LA COLUMNA DERECHA, EL AMARILLO INDICA TERRENOS URBANOS SECOS Y EL AZUL INDICA TERRENOS URBANOS INUNDADOS. LAS SALIDAS DEL MODELO LFP CORRESPONDEN EXACTAMENTE AL INSTANTE EN QUE EL SATÉLITE CAPTURÓ LOS DATOS UTILIZADOS EN LA CÁLCULO DE WI.	38
FIGURA 8 RESULTADOS DE WATER INDEX (W) EN EL DOMINIO ESPACIAL COMPLETO 8A) Y SOBRE LA COBERTURA URBANA INTERSECADA CON WI 8B).	39
FIGURA 9 PROFUNDIDAD DE AGUA A PARTIR DE MODELO LFP IMPLEMENTADO USANDO ASTER GDEM, INSTANTE COMPARABLE AL PASO DEL SATÉLITE EN QUE SE OBTUVO LA IMAGEN PARA CALCULAR WI.	40
FIGURA 10 PROFUNDIDAD DE AGUA A PARTIR DE MODELO LFP IMPLEMENTADO USANDO LIDAR DEM MINVU, INSTANTE COMPARABLE AL PASO DEL SATÉLITE EN QUE SE OBTUVO LA IMAGEN PARA CALCULAR WI.	41
FIGURA 11 ÁREA MÁXIMA INUNDADA PARA EVENTO DE 2006 A PARTIR DE MODELO LFP IMPLEMENTADO (LIDAR DEM). ARRIBA SE MUESTRA TODO EL DOMINIO ESPACIAL MIENTRAS QUE ABAJO SOLO CONSIDERA EL ÁREA URBANA.	42
FIGURA 12 LOCALIZACIÓN DE REGISTROS CIUDADANOS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURAS DE AGUA AL MOMENTO DE LA INUNDACIÓN DE 2006.	45
FIGURA 13 REGISTROS CIUDADANOS (BIBLIOGRAFÍA GRIS) UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ALTURA DE AGUA DURANTE LA INUNDACIÓN DE 2006. LOS PUNTOS AZULES INDICAN PUNTOS HOMÓLOGOS ENTRE IMÁGENES DE ARCHIVO Y LAS ACTUALES.	49
FIGURA 14 DE ARRIBA A ABAJO, SALIDA DEL MODELO LFP PARA EVENTOS FUTUROS. A LA IZQUIERDA, EL REGISTRO DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL; EN EL CENTRO, LA SUPERFICIE MÁXIMA INUNDADA DE TODO EL DOMINIO ESPACIAL Y, A LA DERECHA, EN AMARILLO EL SUELO URBANO INUNDADO EN EL RANGO DE 0,2M A 0,2+RMS (0,96M) Y EN ROJO LA INUNDACIÓN SUPERIOR A 0,96M.	57

RESUMEN

El estudio de inundaciones alrededor del mundo toma mayor relevancia ante el actual escenario de cambio climático y las consecuencias crecientes de este tipo de fenómenos en el futuro. Además, las inundaciones repentinas se vislumbran con una mayor recurrencia a medida que avanza este siglo, donde las modelaciones hidrodinámicas forman parte de lo habitual para evaluar esta amenaza. Sin embargo, aparentemente los modelos operan de una forma óptima sobre grandes extensiones de territorio, dejando un vacío considerable para la toma de decisiones de nivel local.

Este trabajo pone a prueba el desempeño del modelo hidrodinámico bidimensional LISFLOOD-FP para la reconstrucción de un evento de inundación del año 2006 en la parte baja de la subcuenca del río Andalién, Zona Costera del Centro-Sur de Chile (ZCCSC), evaluando las consecuencias de futuro a partir de predicciones climáticas. La validación del modelo se efectuó mediante ciencia ciudadana y el evento de 2006 fue insumo para identificar precipitaciones acumuladas similares en los periodos 2045-2050 y 2095-2100 desde el conjunto WRF-CESM, dispuestos a una resolución $\sim 9\text{km/pixel}$. Del conjunto de datos WRF-CESM, solo se lograron identificar eventos iguales o superiores al de 2006 para la precipitación acumulada de 5 días, 1 evento para mitad de siglo y 2 eventos para fin de siglo. Luego, se cuantificó la extensión de dichas inundaciones e identificaron las zonas afectadas. Sin embargo, estas inundaciones representan un área inundada menor a la registrada en 2006, a pesar de que las cantidades de precipitación acumuladas son mayores a la del evento de referencia. Los resultados sugieren que las zonas urbanas, todavía en expansión, seguirán siendo afectadas por inundaciones repentinas en el futuro, por lo que mejorar la calibración de modelos hidrodinámicos bidimensionales para el futuro puede ser útil para que los planificadores del territorio y otros responsables mejoren su toma de decisiones.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son el tipo de catástrofe socio-natural más frecuente en el mundo y afectan cada año a un mayor número de personas. Este tipo de catástrofe puede volverse más frecuente como consecuencia del cambio climático y sus efectos sobre la ocurrencia de precipitaciones extremas, e.g., Tabari (2020). Recientemente, eventos de precipitaciones extremas han afectado a diferentes regiones del mundo, desencadenando inundaciones repentinas, anegamientos, crecidas de ríos e incluso grandes deslizamientos, dejando entre miles y millones de personas afectadas, ejemplo de ello son, inundaciones en la región sudeste de Sudáfrica (Naidoo et al., 2022), deslizamientos, flujos de escombros e inundaciones repentinas en Italia (Abbate et al., 2021), así como otras inundaciones extensas en Europa central y septentrional (Cornwall, 2021; Jones et al., 2022; Papagiannaki et al., 2022). La pérdida resultante de vidas y medios de subsistencia, así como de infraestructuras, demuestra que hay poca o ninguna preparación para hacer frente al complejo escenario actual del cambio climático.

1.1 Antecedentes generales, motivación y relevancia.

El Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED, 2020) estableció que para el año 2019, de los 95 millones de personas afectadas por catástrofes

naturales en todo el mundo, el número de víctimas mortales ascendió a 11.755 , con 103.000 millones de dólares en pérdidas económicas; las inundaciones fueron el tipo de catástrofe más letal, alcanzando un 43.5% de las muertes, seguidas de las temperaturas extremas y las tormentas. Por su parte, las inundaciones fueron las segundas, luego de las tormentas, en número de personas afectadas, alcanzando un 33% del total de casos. Del mismo modo, hay antecedentes de que los riesgos de inundaciones son más frecuentes en el mundo en desarrollo, ya que los países de bajos y medianos ingresos es donde habita el 89% de las personas expuestas a inundaciones del mundo (Rentschler et al., 2022).



Según la Organización Mundial del Clima (WMO/UNESCO, 2012) las inundaciones repentinas o “Flash-flood” se definen como “eventos de corta duración con descarga máxima relativamente alta”. Por otro lado, el *National Weather Service* (NWS-USA, 2022) indica que una inundación es consecuencia de un evento detonante, tal como lluvia excesiva, fallo de una presa o dique, liberación repentina de un atasco de escombros o hielo, colapso de un lago glaciar, entre otras. La principal diferencia entre una inundación normal y una inundación repentina es la velocidad con la que se produce, es decir, el tiempo de respuesta de la cuenca a las precipitaciones, lo que se traduce en un plazo muy acotado para la detección, previsión y generar la alerta adecuada. Este tipo de inundaciones suelen ser de relativa pequeña extensión, desarrollarse en zonas de pendientes pronunciadas de las cuencas, escasa cobertura de

vegetación y flujos de alta velocidad, usualmente en ríos pequeños; lo que sumado al lugar geográfico donde se desarrolle, además, podría activar importantes procesos de transporte de sedimentos, lo que en conjunto derivan en gran numerosas pérdidas de vidas y de propiedades (UNESCO, 1999; WMO/UNESCO, 2012). Si bien hay antecedentes mayoritarios que este tipo de eventos se desarrollan principalmente en cuencas pequeñas, también existen datos que avalan la posibilidad de que abarquen cuencas de mayor tamaño como resultado de tormentas convectivas y provocar lluvias de hasta 12 horas de duración. A pesar de todo, las inundaciones repentinas siguen siendo un fenómeno poco documentado, se presentan con fuerte estacionalidad y en mayor magnitud en los países o zonas mediterráneas según lo analizado en Europa por Gaume et al. (2009).

Las precipitaciones extremas, son el resultado de un alto índice de precipitaciones sostenidas, que a menudo desencadenan inundaciones repentinas, las que llevan consigo graves daños para las personas que habitan los territorios donde ocurren. Esto sucede tanto en Chile como el resto del mundo, donde se buscan y evalúan constantemente alternativas para adaptarse a los desafíos que estas sobreponen para la sociedad y su desarrollo (Alfieri et al., 2019; Doswell et al., 1996; Espinosa et al., 2018; Rojas, 2015).

Hoy en día se trabaja arduamente en formas de implementar sistemas de alerta temprana para inundaciones repentinas, donde los que se encuentran operativos a niveles regionales o nacionales habitualmente se basan en previsiones y datos

meteorológicos cercanos al tiempo real, y que apuntan a mejorar su desempeño en los pronosticadores de inundaciones locales; es así como autores como Alfieri et al. (2019) destacan que para implementación de las aplicaciones que pronostican inundaciones locales, en diferentes áreas, se requiere un diseño cuidadoso y adaptado a la disponibilidad de datos locales. WMO/UNESCO (2012) indica que, a diferencia de las inundaciones fluviales, en las inundaciones repentinas se hace muy necesario la información local, y a pesar de existir gran número de modelos numéricos de predicción meteorológica, no siempre son apropiados para estudiar las inundaciones repentinas dadas las escalas temporales y espaciales a las que se ejecutan, donde la alta resolución espacial y temporal podría mejorar la capacidad de los modelos implementados o desarrollar nuevos y mejores, así como brindar alertas precisas y oportunas.

Un aspecto importante aparece cuando nos referimos a inundaciones urbanas, ya que puede producirse una cantidad significativa de escorrentía de aguas superficiales durante precipitaciones intensas y su gravedad estará directamente relacionada a una amplia gama de factores, entre ellos la topografía, la infraestructura y el entorno urbano; como también los flujos de drenaje superficiales como subsuperficiales, además, podrían intervenir los caudales de ríos y canales presentes en la zona (Sene, 2013). Otro aspecto se relaciona con los cambios en las precipitaciones subdiarias, las que se espera afecten significativamente la magnitud y la frecuencia de las inundaciones repentinas en

zonas urbanas y rurales como respuesta al clima futuro más cálido (Westra et al., 2014).

La zona central de Chile actualmente pasa por un periodo prolongado de déficit de precipitaciones, lo que se ha denominado megasequía (Garreaud et al., 2017), y dadas las características que presentan las inundaciones repentinas, las que son originadas por lluvias intensas en cortos periodos de tiempo, es que este factor podría acrecentar los efectos de estos desastres producto de forzamientos que implican sobre el suelo y la vegetación.

Apel et al. (2009) compararon el modelo LISFLOOD-FP (LFP), respecto enfoques más simples y otros más complejos, en su habilidad para reconstruir un evento de inundación local en una ciudad de Alemania. Tanto para LFP como para el modelo más complejo obtuvieron un rendimiento global comparable al de su referencia, especialmente en términos de profundidades de agua y extensión de la inundación. Ese estudio también constató que la implementación y el tiempo computacional del modelo LFP implican una ventaja importante a tener en cuenta. Shustikova et al. (2019) destacan el rendimiento de LFP en comparación a modelos más tradicionales como es HEC-RAS, donde según el origen de los datos, posibilita realizar simulaciones más rápidas si estos corresponden a datos de alta resolución espacial. Estos datos pueden ser empleados en una resolución más gruesa para hacer más eficientes los procesamientos, con lo cual, las simulaciones siguen arrojando resultados adecuados, pero se debe considerar

que la resolución debe estar definida cuidadosa y previamente, dependiendo del estudio que se quiere implementar.

El análisis local de las inundaciones repentinas en un contexto urbano con previsiones de mediados a finales de siglo (basadas en proyecciones climáticas) proporciona una base importante para seguir investigando en este ámbito emergente del análisis de riesgos futuros y sus posibles efectos en zonas densamente pobladas, vinculando aspectos de la reducción del riesgo de desastres y la resiliencia al cambio climático antropogénico. Sin embargo, pocos investigadores han abordado este problema en el hemisferio sur y/o en países en desarrollo, por ejemplo, en Bangladesh (Mirza, 2002) o Indonesia (Mishra et al., 2018). Esto significa que, debido a la falta de conocimientos y otros aspectos socioeconómicos de la población, esta se vuelve vulnerable a medida que aumenta el riesgo de este tipo de eventos.

Así, esta investigación combina un conjunto de datos de proyecciones climáticas regionales (específicamente WRF-CESM) con el modelo LISFLOOD-FP para los siguientes períodos de 5 años 2045-2050 y 2095-2100. El objetivo es identificar, aplicando una modelación hidráulica 2D, si ocurren eventos de inundación repentina de igual o mayor magnitud a un evento de referencia que afectó a la Zona Costera Centro-Sur de Chile (ZCCSC) en 2006 en función de la precipitación generada. En particular, se trabajó en la parte baja de la subcuenca del río Andalién ($\sim 36^{\circ}49'S$), que cubre una parte importante del área urbana de

Concepción, región del Bio-Bío, Chile, una de las zonas urbanas más pobladas del país (Pauchard et al., 2006).

1.2 Hipótesis

Bajo el escenario RCP8.5, existe al menos un evento de inundación repentina que se desencadena sobre la Zona Costera Centro-Sur de Chile (ZCCSC), afectando esencialmente a los mismos sectores urbanos y de similar magnitud que lo registrado en julio de 2006 en la parte baja de la subcuenca del río Andalién en la ciudad de Concepción, Chile.



1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la amenaza de inundación repentina para el futuro, basado en proyecciones climáticas regionales, en la Zona Costera Centro-Sur de Chile (ZCCSC) y analizar sus implicancias en el riesgo socio-natural.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar el evento de precipitación ocurrido en julio de 2006 sobre la ciudad de Concepción en términos de su función de densidad de probabilidad.
2. Identificar en el conjunto de datos futuros WRF-CESM, todo evento de precipitación máxima anual acumulada, igual o superior al evento ocurrido en 2006 sobre la ciudad de Concepción.
3. Determinar la viabilidad de LISFLOOD-FP para modelar hidrodinámicamente el comportamiento de los eventos de futuro identificados, y conocer si son, y en qué magnitud, generadores de inundación/inundación repentina.
4. Discutir las principales implicancias de los riesgos socio-naturales para la Zona Costera Centro-Sur de Chile (ZCCSC).

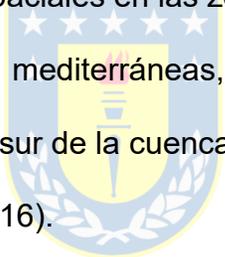
1.4. Área de estudio

Este estudio se centró en el tramo inferior de la subcuenca del río Andalién, zona costera de la Región del Biobío (Figura 1) y que forma parte de la cuenca llamada “Costeras e Islas entre Río Itata y Río Bio-Bio” según inventario de cuencas y subcuencas de la Dirección General de Aguas. La superficie de la subcuenca Andalién es de 794 km². Las cabeceras se encuentran en la Cordillera de la Costa chilena, mientras que al oeste dominan las planicies aluviales de sedimentación, donde se ubica la ciudad de Concepción. Al noreste, hay llanuras marinas y fluvio-marinas (Börgel, 1983). Climáticamente, se trata de una zona templado-mediterránea, con alrededor de 1250 mm anuales, una marcada estación seca entre diciembre y febrero (DJF), y un invierno austral lluvioso de junio a agosto (JJA) que alcanza aproximadamente 664 mm (Martínez-Retureta et al., 2020). Cerca del estuario, las precipitaciones en la subcuenca son de 984,3 mm anuales y el caudal medio diario es de 12,7 m³/s (DGA/MOP, 2023; DMC, 2023).

Estudios previos han documentado el control que ejercen las precipitaciones sobre la ocurrencia de inundaciones en el dominio climático mediterráneo, destacando la importancia de los eventos de precipitación intensa en el desarrollo de este tipo de catástrofes, por ejemplo, Rojas et al. (2014). Cabe mencionar que la llanura de inundación sobre el área urbana adyacente al río Andalién es una zona altamente vulnerable dado el gran número de personas que podrían verse afectadas por eventos de inundación repentina ante precipitaciones extremas

que podrían ocasionar complicaciones similares a las desastadas en el evento de 2006 (ONEMI, 2006; Vidal & Martel, 2007).

Otras regiones mediterráneas, desarrolladas principalmente en las costas occidentales de todos los continentes entre las latitudes 30° y 45° (S y N), como el sur de África, California, el suroeste y el sur de Australia y la cuenca Mediterránea en África y Europa, debido a los patrones globales de circulación del aire también han registrado en el pasado periodos secos y episodios de inundaciones debido a precipitaciones extremas, donde las diferencias que éstos pueden presentar, están asociadas a los subtipos climáticos de cada zona. Además, se prevén cambios espaciales en las zonas climáticas regionales hacia finales de siglo, incluyendo las mediterráneas, esperando que estos cambios sean más severos para la parte sur de la cuenca Mediterránea, el sur de África y Australia (Thiébault & Moatti, 2016).



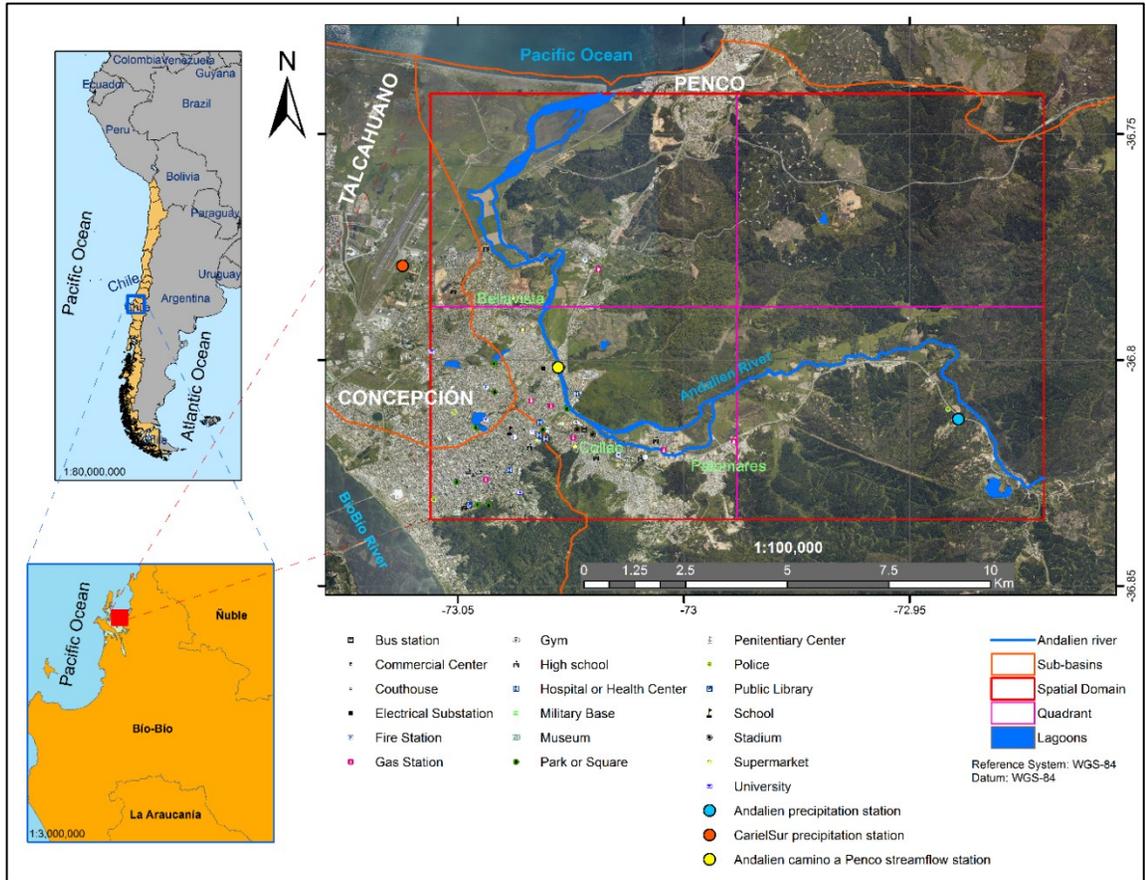


Figura 1 Dominio espacial con imagen aérea (MINVU, 2013) como fondo. También muestra el curso principal del río Andalién y la distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se explica cómo se estructuró el experimento, dando primero los antecedentes del suceso de inundación de referencia (histórico), indicando después qué datos se utilizaron en el modelo hidrológico bidimensional LISFLOOD-FP, cuál fue el método de validación y, por último, en qué consistió la integración de los datos futuros del WRF-CESM en el modelo hidrológico.

2.1. Descripción evento de julio 2006

Entre el 10 y el 13 de julio de 2006, la ZCCSC fue afectada por un fuerte sistema frontal que se extendió desde la región de la Araucanía (39°S de latitud) hasta la región de Valparaíso (33°S de latitud). Este sistema frontal fue particularmente agresivo sobre la región del Bio-Bío (37°S de latitud) y trajo una variedad de consecuencias, incluyendo la interrupción de servicios básicos, cortes de energía, cierre de caminos, deslizamientos de tierra, inundaciones y pérdida de vidas humanas. La ciudad con mayor número de damnificados fue Concepción que contabilizó alrededor de 120.000 personas en situación de desamparo, superando el 50% de la población total de la ciudad ese año. Este evento es uno de los más fuertes jamás registrados en la zona, correspondiendo a un ejemplo adecuado para estudiar las consecuencias de las lluvias torrenciales. Según los datos registrados en la estación Andalién para julio de 2006 (Figura 1) la acumulación de precipitación fue anormalmente alta, con más de 230 mm en 5 días (Tabla 1).

Tabla 1 Precipitación acumulada para la estación de Andalién en el evento meteorológico de julio de 2006

Nombre Estación	Tiempo de acumulación (días)	Precipitación (mm)
Andalién	1	140
	2	158
	5	234

El dominio espacial de este estudio (ver Figura 1), se encuentra ubicado en la Región del Biobío, entre las coordenadas (Lat/Long) 36°50'7"S, 73°3'21.8"W y 36°44'27.8"S, 72°55'13.3"W, abarcando principalmente la sección inferior de la subcuenca del Río Andalién; el dominio abarca desde 200 metros antes de la desembocadura hasta aproximadamente 25 km río arriba en el cauce principal. Este dominio espacial, además, incluye secciones pequeñas de otras subcuencas circundantes, entre ellas, la subcuenca Costeras entre Río Andalién y Río Biobío, subcuenca Costeras entre y Río Pingüeral Río Andalién y subcuenca Río Biobío Bajo. El dominio espacial seleccionado abarca un área total de 126.9 km², es decir, unas 12.690 ha; este incluye parte de la ciudad de Concepción, siendo de nuestro particular interés la zona urbana que colinda con el río Andalién.

2.2. Implementación del Modelo Hidrodinámico LISFLOOD-FP

El evento de julio de 2006 se modeló utilizando el software hidrológico bidimensional LISFLOOD-FP versión 7.0.4. y la subrutina del modelo subgrid. LISFLOOD-FP (LFP) es un modelo hidráulico bidimensional basado en raster que funciona en base a la elevación del terreno. Simula la propagación dinámica de

una inundación en las respectivas llanuras fluviales (Bates & De Roo, 2000). El modelo hidráulico opera sobre un modelo base que considera el tamaño de celda completo o bajo el método de modelo de sub-cuadrícula propuesto por Neal et al. (2012). De esta forma, tiene acceso a representar dimensiones de canal menores que el tamaño de celda raster (ver Figura 2). El modelo puede calcular el flujo combinado de agua en cada celda, en cada paso temporal, utilizando una aproximación a la ecuación unidimensional de St. Venant sin advección. Para casos más complejos, el modelo utiliza las ecuaciones completas de aguas poco profundas. LFP también requiere datos de precipitación, uso/cubierta del suelo y rugosidad de las llanuras de inundación, así como datos sobre la geometría y las dimensiones de los canales.

En la modelación se probaron dos modelos digitales de elevación (DEM), donde el primero corresponde al modelo de acceso abierto ASTER Global Digital Elevation Model versión 3 (ASTER GDEM v3) creado bajo la metodología expuesta por Fujisada et al. (2012) el cual fue generado utilizando escenas ASTER Nivel-1A adquiridas entre el 1 de marzo de 2000 y el 30 de noviembre de 2013, sin especificar la fecha exacta de cada escena (Abrams & Crippen, 2019), este DEM tiene una resolución espacial de ~30m. El segundo proviene de un vuelo LiDAR de 2013, propiedad del Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile (MINVU) que fue solicitado por Ley de Transparencia. Este DEM, originalmente dispuesto a una resolución espacial de 5m por pixel, fue agregado a ~30m para

mantener la equivalencia con el primer DEM y asegurar que todas las simulaciones fueran computacionalmente eficientes.

Hunter et al. (2008) apoyan la utilidad de los datos LiDAR en combinación con datos de cartografía digital y fuentes de teledetección (por ejemplo, LULC, edificios, etc.) señalando que la incertidumbre tiende a concentrarse principalmente en los parámetros de fricción del terreno. Probaron varios modelos 2D y simularon inundaciones urbanas, estableciendo que los flujos se caracterizan por numerosas transiciones que causan efectos en puntos específicos de la zona, pero que no afectan a la propagación global de la inundación. Por otro lado, concluyen que las diferencias en la elevación del agua prevista y las condiciones relacionadas con la microtopografía compleja pueden dar lugar a diferencias significativas entre el escenario simulado y el evento de referencia, estimando que la sensibilidad de las inundaciones urbanas a la microtopografía se desarrolla en un sentido no lineal y que resulta en al menos un 10% de incertidumbre en la modelización.

Se utilizó el coeficiente de rugosidad de *Manning* (valor n) aplicando el método de Cowan (Coon, 1998; Cowan, 1956) para cada una de las coberturas de suelo indicadas por el registro vegetacional realizado por la Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF) en el año 2015. Por otra parte, se utilizaron datos de geometría de cauce tales como línea central (obtenida de digitalización realizada sobre imágenes satelitales), ancho, distancia al cauce o lecho obtenidos de informes técnicos mandados por el Ministerio de Obras Públicas de Chile a

través de la Dirección de Obras Hidráulicas (MOP/DOH, 2008) y datos relativos a la cota de ribera obtenidos directamente del DEM. Además, se agregó al modelo un punto de caudal conocido en la posición de la estación "Andalién Camino a Penco", aportando condiciones de borde, según el manual de LISFLOOD-FP. Esta estación con registro de caudal diario está ubicada en el km 10.2 aguas arriba (para más detalles, ver sección 2.3).

Para las simulaciones, se partió de un canal de forma rectangular con el fin de probar una modelización sencilla en términos de cantidad de datos (*input*) que sea fácil, rápida de aplicar y eficiente desde el punto de vista computacional. La atención se centró en la superficie de agua acumulada procedente de las precipitaciones y del desbordamiento de los ríos, con especial atención a la parte urbana de la zona de estudio. No se consideraron aspectos relacionados con la infiltración y la escorrentía (Neal et al., 2012), ni la influencia del nivel del mar que podría afectar al tramo final y más bajo del río, zona que no está poblada y corresponde al humedal costero Rocuant-Andalién.

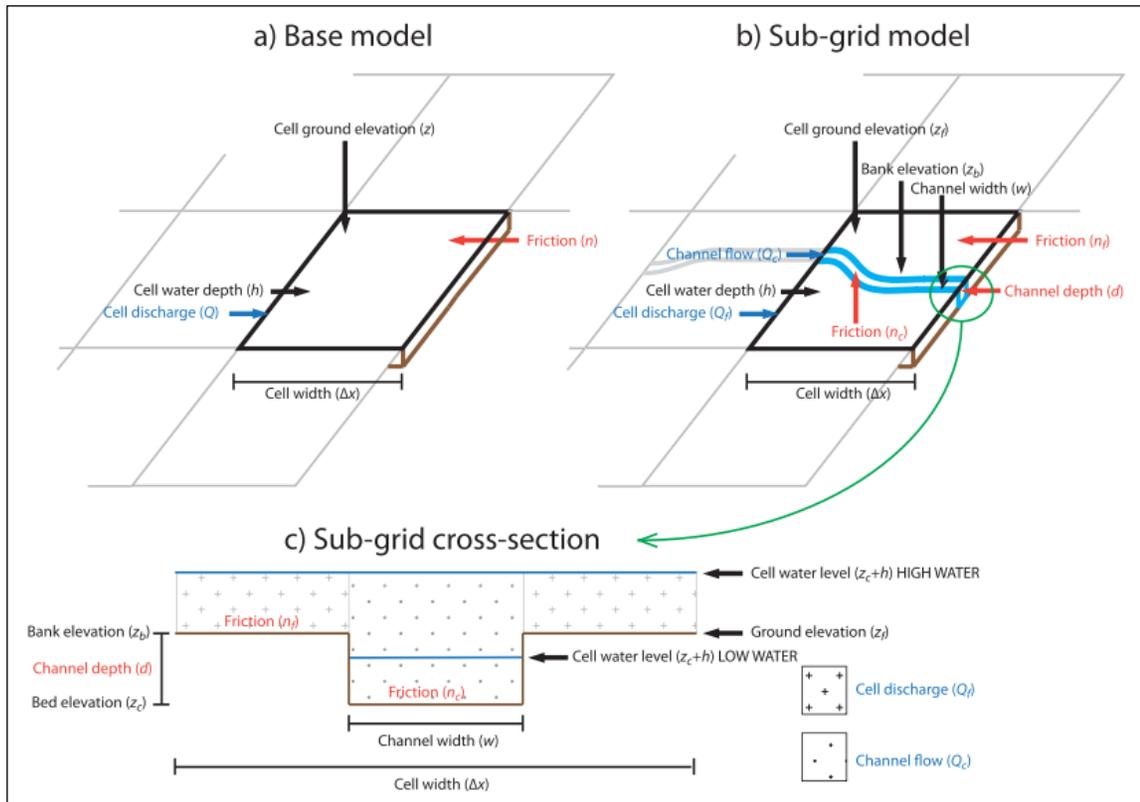


Figura 2 Diagrama conceptual de (a) el modelo base de LISFLOOD-FP, (b) el modelo de canales sub-grid y (c) la sección sub-grid. Fuente: (Neal et al., 2012)

Los datos geométricos del río como ancho y lecho corresponden a datos extraídos de perfiles transversales consistentes con proyectos de defensas fluviales y encauzamiento del río Andalién, obras ejecutadas con posterioridad al año 2006 y detalladas en los informes "Diseño de obras fluviales río Andalién, esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Biobío" (MOP/DOH, 2008) y "Diagnóstico del río Andalién 2015, Provincia de Concepción, Región del Biobío" (MOP/DOH, 2015) mandatados por la DOH del MOP. El uso de datos generados con posterioridad al evento de 2006, sin duda agrega cierto grado de

incertidumbre al modelo. Sin embargo, esto puede servir para evaluar si el evento (bajo las condiciones originales en que se generó, y más actualmente las modificaciones al cauce y planicie de inundación que se capturan en el DEM 2013, así como ancho y lecho derivados de perfiles transversales) aún podría tener el potencial de ser gatillado y con qué nivel de significancia. Esto es altamente probable ya que, según la hipótesis planteada, el evento depende principalmente de precipitaciones intensas, y en menor medida, por la acción de desbordamiento del río.

El evento de 2006 se simuló considerando 9 días, con salidas cada 2 horas y aplicando el modo de resolución Subgrid (agregando por ej., SGCwidth, SGCbed y SGCbank). Tras obtener los resultados de las simulaciones para el evento de 2006, los píxeles con una altura de agua superior a 20 cm se adoptaron como "píxel inundado". Algunos autores consideran, para el mismo propósito (pero en diferentes latitudes) alturas de agua superiores a 10 cm (Fernández et al., 2016) o superiores a 15 cm (Wing et al., 2017).

2.3. Forzamiento hidrometeorológico para LISFLOOD-FP

La entrada fundamental para las ejecuciones de LFP es la tasa de precipitación y el caudal que entra en el dominio. Se incorporaron las series temporales de precipitación del evento de julio de 2006, en el que se registraron 5 días de precipitación continua, añadiendo 4 días anteriores para simular las condiciones de humedad y saturación del suelo existentes en la zona de estudio. Los datos

históricos de precipitación y caudal se recogieron del Explorador Climático del Centro para la Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), una página web que publica datos de la red meteorológica de la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorología de Chile (DMC). De esta forma, se seleccionaron las estaciones de la zona de estudio que disponían de registros útiles, comprobando y corrigiendo la existencia de saltos en las series de datos o la existencia de datos atípicos mediante métodos gráficos. En este sentido, las estaciones pluviométricas y fluviométricas relevantes para este estudio se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Estaciones meteorológicas en el área de estudio

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)	Fuente	Años de Registro	Variable
Andalién	-36° 48' 47.0016"	-72° 56' 20.0004"	37	DGA	2001 a 2018	Precipitación
Carriel Sur	-36° 46' 49.9944"	-73° 03' 58.9968"	13	DMC	1950 a 2020	Precipitación
Andalién Camino a Penco	-36° 48' 6.0012"	-73° 01' 40.0008"	7	DGA	1961 a 2019	Caudal

El evento de 2006 afectó varias zonas de Concepción, particularmente los sectores Collao, Bellavista y Palomares (ver Figura 1, texto en verde). Por esta razón, dado que la estación "Andalién" se encuentra más cercana al cauce del río y a la vez ubicada en una zona más alta que la planicie de inundación principal, esta estación proporciona registros de precipitación claves en las zonas que alimentaron la crecida del río del mismo nombre, por lo que se decidió analizar su comportamiento histórico para caracterizar el evento en cuestión. Dado que

esta estación tiene un registro de datos limitado a 19 años, 5 de ellos anteriores al evento de 2006, fue necesario buscar la relación existente con otra estación de monitoreo para generar una serie temporal de largo plazo. Así, se aplicó un modelo lineal para reconstruir una serie más extensa para "Andalién" a partir de los registros de la estación "Carriel Sur". Esta estación es la única cercana al área de estudio que ha mantenido un registro mayor a 30 años, lo cual cumple con las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Además, la estación "Carriel Sur" está a sólo 11,6 km de Andalién, con sólo 24 m de diferencia de altitud, y se encuentra a sólo 2 km del cauce del río. A partir de esta nueva serie de datos tomados de la estación "Andalién", obtuvimos los índices de precipitación máxima acumulada anual para 1, 2 y 5 días, denominados Rx1day, Rx2day y Rx5day, respectivamente. Estos índices son comúnmente utilizados para la caracterización climática.

Posteriormente, se analizó el comportamiento estadístico de cada Rxday (para 1, 2 y 5 días), se calculó la Función de Frecuencia Acumulada (CDF) y con ello se identificaron los percentiles 90, 95 y 99. Además, se obtuvieron los porcentajes de excedencia del evento meteorológico de referencia.

Para cada índice, se calculó el ajuste de todas las funciones de distribución continua incluidas en el software EasyFit v5.6, en total fueron 61 distribuciones a cada conjunto de datos. Se asumió como hipótesis nula (H_0) que la distribución de los datos no es estadísticamente diferente de la distribución teórica presentada, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) indica que la distribución

es estadísticamente diferente de la teórica presentada. El criterio de selección utilizó el estadístico Kolmogorov-Smirnov (K-S) con un nivel de significación de 0,01 en cada conjunto de datos. A continuación, de las 61 distribuciones posibles, se eligió una. El criterio de selección final fue utilizar la distribución más habitual en el análisis de datos hidrológicos, tal como recomienda Cunnane (1989).

En cuanto a los datos de caudales utilizados como insumo en el modelo de validación, éstos fueron tomados directamente de los registros diarios de la estación "Andalién Camino a Penco". Sin embargo, al no disponer de datos de caudales futuros, éstos se calcularon a partir de un modelo lineal obtenido de la relación entre la precipitación registrada en la estación "Andalién" y el caudal registrado en la estación "Andalién Camino a Penco" para el periodo otoño-invierno de 2006. Ambas estaciones están ubicadas a 12,5 km a lo largo del cauce del río Andalién. Además, el modelo lineal consideró el tiempo de respuesta de la subcuenca, es decir, el tiempo que tardó en producirse el aumento del caudal después de la precipitación máxima registrada (spin-up). Como puede observarse en la Figura 3, este spin-up corresponde a 48 horas.

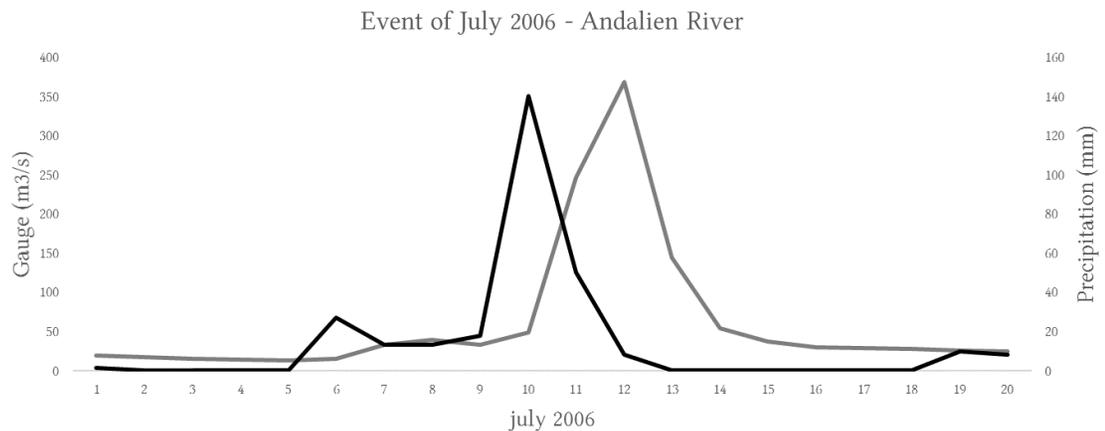


Figura 3 Precipitación (línea gris) y caudal (línea negra) registrado para julio en evento de 2006.

2.4. Validación modelo de inundación 2006

El MOP informa que las descargas pluviales fueron bloqueadas durante el evento, retrasando el drenaje total de la ciudad por cerca de una semana. Estos antecedentes permitieron mapear con mayor certeza la inundación utilizando imágenes satelitales y calcular *Water Index* (WI) propuesto por Fisher et al. (2016), el cual utiliza la reflectancia superficial de las bandas Landsat TM/ETM+, junto con un valor constante y algunos escalares, específicamente para las bandas (ρ) b_2 , b_3 , b_4 , b_5 y b_7 (ver ec. 1). Con la diferencia de que los valores de reflectancia superficial se obtuvieron directamente de la colección de datos Landsat Nivel 2 (USGS, 2021) en lugar de seguir la metodología de Flood et al. (2013).

$$WI_{2015} = 1.7204 + 171\rho_{b2} + 3\rho_{b3} - 70\rho_{b4} - 45\rho_{b5} - 71\rho_{b7} \quad (1)$$

Los datos disponibles para ello correspondieron al 13 de julio de 2006, dos días después del peak de precipitación y un día después del caudal máximo. Para

efectos de este trabajo, las áreas inundadas por la intensidad y acumulación de la precipitación, y las áreas inundadas debido al desbordamiento del río Andalién se asumieron como inundadas. Por otra parte, el modelo hidrológico utilizado no consideró la modelación del arrastre de sedimentos, lo que constituyó (a-priori) otra fuente de incertidumbre.

La extensión inundada sobre el área de estudio se determinó con base en datos satelitales del sensor Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) con una resolución espacial de ~30m, aplicando el índice WI para datos del 13 de julio de 2006. Cabe mencionar que el sensor ETM+ proporciona datos con vacíos de información debido a un fallo en el *Scan Line Corrector* (SLC); para corregirlo se utilizó un paquete de herramientas llamado *Landsat 7 SLC-off Gap-Filled* creado por la USGS (2004) (Asare et al., 2020; Chen et al., 2011; Zhu et al., 2012). Se eligió WI (Fisher et al., 2016), porque en las pruebas realizadas se comportó mejor que otras combinaciones de bandas en la delineación de la extensión de la inundación reportada por estudios anteriores, por ejemplo, Vidal and Martel (2007). Otros índices probados fueron NDWI (Gao, 1996; McFeeters, 1996), MNDW (Xu, 2006), AWEI (Feyisa et al., 2014), IWI (Tang et al., 2022) e ICEDEX (Angel & CEDEX, 1994).

El satélite Landsat ETM+ orbitó el área de estudio 1 día después del caudal máximo del río Andalién y 2 días después del pico de precipitación. A partir de estos datos satelitales, se calculó el índice WI para obtener el área cubierta por agua en el momento del paso del satélite, que ocurrió aproximadamente a las

10:00 AM (UTC -4) del 13 de julio de 2006. Aquí, cabe mencionar que este índice es capaz de percibir pequeñas alturas de agua en suelo desnudo, cemento, asfalto u otras superficies. Todas esas coberturas pueden no estar necesariamente inundadas, pero podrían tener apenas algunos centímetros de altura y ser identificadas por el índice. Otro factor importante corresponde a las características del agua que está siendo cartografiada ya que existen diferencias entre el desempeño de los índices en los casos en que el agua tiene baja o alta turbidez. Todo lo anterior podría llevar a agregar incertidumbre a los cálculos posteriores, por lo tanto, es necesario tomar estos resultados con cautela (Fisher et al., 2016).



Además, se construyó una imagen RGB a ~15m de resolución espacial mediante un proceso de pansharpening (Amro et al., 2011), que permitió determinar inicialmente la extensión de la inundación en el espectro visible, comparándola con registros fotográficos ciudadanos y otras fotos obtenidas por el Ministerio de Obras Públicas mediante un sobrevuelo post-inundación en 2006, para después compararla con el resultado del índice WI. Sólo se excluyeron algunas zonas al este del área de estudio con nubosidad, ya que el índice WI la clasificaba en el mismo rango que el agua superficial. Una vez clasificadas las zonas con presencia/ausencia de agua superficial durante el evento de 2006, este resultado se asumió como mapa de referencia (*Benchmark*).

De cada simulación se escogió la salida correspondiente a la hora y día en que el satélite captó la imagen sobre la zona, comparando ambos conjuntos de datos

donde WI representa la inundación real versus el resultado de cada simulación. Para ello se aplicaron 5 índices básicos de ajuste binario o Rendimiento, considerando el área correspondiente a la cobertura urbana dentro del cuadrante SO del área de estudio. Esto se debe a que dicho cuadrante cubre el 70% de toda el área urbana del área de estudio. Por otro lado, se excluyeron los cuadrantes SE y NE por estar afectados por la presencia de nubes en la imagen Landsat y la clasificación de áreas boscosas oscuras que WI clasificó como agua. Los índices de Rendimiento determinan la habilidad espacial de la modelización en función de la presencia o ausencia de agua sobre una celda (Bates & De Roo, 2000; Fernández et al., 2016; Wing et al., 2019). En este caso, según el criterio establecido de 20cm, estos índices binarios se corresponden con los indicados por Wing et al. (2019), Índice de aciertos (HR), Índice de falsas alarmas (FAR), Índice de éxito crítico (CSI) y Sesgo de error (EB). El conjunto de índices permite evaluar la capacidad del modelo para predecir el área inundada y sus respectivas limitaciones o incertidumbres.

$$HR = \frac{M_W B_W}{M_W B_W + M_D B_W} \quad (2)$$

$$FAR = \frac{M_W B_D}{M_W B_D + M_W B_W} \quad (3)$$

$$CSI = \frac{M_W B_W}{M_W B_W + M_D B_W + M_W B_D} \quad (4)$$

$$EB = \frac{M_W B_D}{M_D B_W + M_W B_D} \quad (5)$$

Donde, M y B corresponden a los píxeles de los modelos de validación implementados (utilizando DEM ASTER GDEM v3 y DEM LiDAR MINVU) y la referencia (WI), respectivamente. Los subíndices corresponden a las condiciones de presencia de agua superficial (W) y ausencia de agua superficial (D) en los píxeles, considerando siempre el umbral mínimo de 20cm en la columna de agua definido para considerar ese píxel como inundado o no.

La tasa de aciertos (HR; ecuación (2); óptimo = 1) es una medida de la deficiencia de predicción del modelo, que sólo penaliza los "fallos". El índice de falsas alarmas (FAR; ecuación (3); óptimo = 0) mide el exceso de predicción del modelo, en el que sólo se penalizan las "falsas alarmas". El índice de éxito crítico (CSI; ecuación (4); óptimo = 1) es la medida más discriminante, ya que penaliza tanto la infrapredicción como la sobrepredicción. Y el último índice es el sesgo de error (EB; ecuación (5); óptimo = 0,5) indica el equilibrio general de infrapredicción y sobrepredicción, pero garantiza que la magnitud de la desviación óptima en cualquier dirección sea coherente: $EB > 0,5$ es sobrepredicción; $EB = 0,5$ es infrapredicción; y $EB < 0,5$ es infrapredicción (Wing et al., 2019).

Para complementar la evaluación entregada por los índices de Rendimiento, se realizó un conjunto de estimaciones de la altura de la columna de agua en la zona urbana de Concepción en relación a la inundación del año 2006. Tal como recomiendan Kaiser et al. (2020), la literatura gris, es decir, artículos periodísticos, información de testigos presenciales y fotografías o videos, o más en general, datos no autorizados como indican Schnebele et al. (2014)

constituyendo recursos asociados a Ciencia Ciudadana (See, 2019), los que entregaron información adicional relevante sobre la inundación de referencia. En particular, imágenes de registros audiovisuales ciudadanos encontrados en diversos sitios web y de la fototeca del MOP correspondientes al mismo día y a los 2 días siguientes a la inundación. Esto permitió estimar la altura de agua en 10 puntos dentro de la ciudad, algunos de los cuales fueron interpretados como secos o no inundados, y luego, comparados con las salidas de los modelos de inundación implementados. La RMS obtenida entre la altura derivada a partir de la ciencia ciudadana (considerando para este cálculo, el máximo y mínimo estimados) comparada con las alturas obtenidas en cada modelo probado será asumida como la incertidumbre de cada uno, la cual será considerada en la cuantificación de inundaciones en eventos futuros.

2.5. Simulaciones para mediados y finales del siglo XXI

Una vez validados con el evento de 2006 y definidos los respectivos porcentajes de excedencia, se procedió a identificar eventos iguales o superiores al evento de referencia en los datos de precipitaciones futuras. Las proyecciones se extrajeron de un *Dynamical Downscaling* regional para los siguientes períodos de 5 años: 2045-2050 y 2095-2100. Estos datos proceden de simulaciones que emplean el modelo WRF para reducir las proyecciones CESM. Este conjunto de datos de clima regional, WRF-CESM, consideró el escenario de cambio climático más pesimista del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5

(CMIP5) utilizando el escenario RCP8.5 que implica un forzamiento radiativo adicional de $8,5 \text{ Wm}^{-2}$ según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC (2013). Este escenario es, en líneas generales, equivalente al escenario CMIP6 SSP5-85 (O'Neill et al., 2016). Los datos prospectivos tienen una resolución espacial de $\sim 9\text{km}$ y fueron calculados mediante *Dynamical Downscaling* (DD) y validados por Fernández et al. (2021).

Las simulaciones se realizaron utilizando las series extraídas de los datos de precipitación de WRF-CESM. Estas series se prepararon a partir de las salidas originales del DD en formato NetCDF individuales cada 6 horas. Las series temporales de precipitación cada 6 horas de estos archivos, se extrajeron utilizando scripts Python v2.7 para las ubicaciones correspondientes a las estaciones pluviométricas utilizadas previamente para modelizar el evento de 2006: "Andalién" y "Carriel Sur". Dado el volumen de información y cantidad de archivos, se decidió tomar como rangos de evaluación los siguientes períodos: 2045-2050 y 2095-2100. Luego, en base a las excedencias calculadas para el evento 2006, se identificaron los posibles eventos futuros que podrían significar inundaciones repentinas en el área de estudio.

Una vez identificados los eventos para mediados y finales de este siglo, se procedió a utilizar estas series de precipitación e incorporarlas al modelo de inundaciones validado. Con ello se obtuvieron las áreas que podrían verse afectadas por variaciones en los regímenes de precipitación, ahora con una

mayor resolución temporal (cada 6 horas) respecto a los registros diarios utilizados en el modelo de validación.

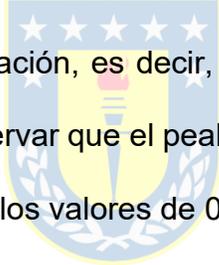
Cabe mencionar que nuestro dominio espacial es pequeño, por lo que esta investigación lleva a cabo un análisis local, y los datos del WRF-CESM cubren casi por completo esta zona con sólo 2 píxeles. Para la construcción de las series temporales de precipitación futura, se consideró apropiado extraer los valores directamente en la celda y no aplicar algún tipo de método de extracción utilizando píxeles vecinos (por ejemplo, interpolación bilineal) que se suele utilizar en dominios espaciales mayores.



3. RESULTADOS

3.1. Resultados del análisis estadístico de los datos históricos

El modelo lineal obtenido a partir de los 19 años de registro común de precipitación diaria entre la estación de Andalién y Carriel Sur arrojó un coeficiente de determinación de 0,75 (ver Figura 4), permitiendo la reconstrucción de 71 años de precipitación diaria para la estación de Andalién. La Figura 5 muestra la precipitación para el evento de 2006 según los datos originales y modelizados estadísticamente de la estación de Andalién. La serie modelada tiende a sobreestimar ligeramente los valores bajos de precipitación y a subestimar los peak de precipitación, es decir, en general tiende a moderar su comportamiento. Se puede observar que el peak alcanza ahora sólo el ~80% del valor original y añade ~10mm a los valores de 0mm del mismo evento.



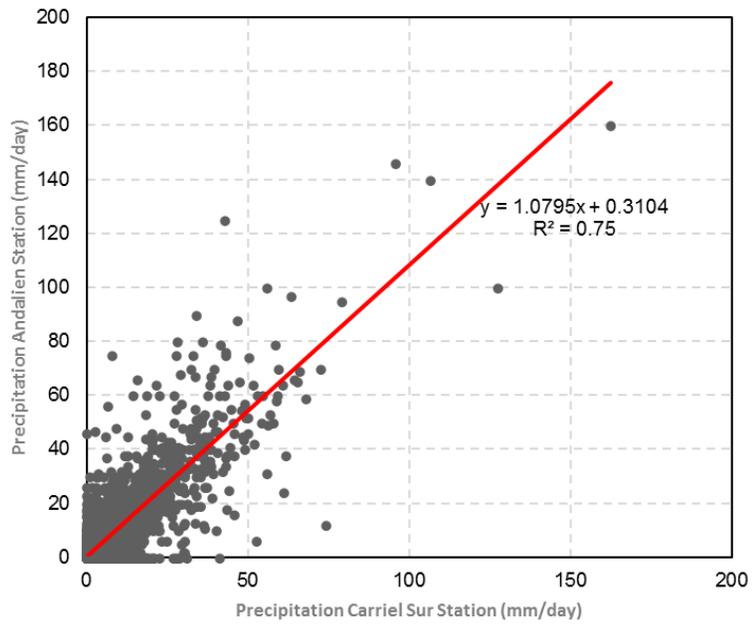


Figura 4 Relación lineal entre datos de precipitación de las estaciones Carriel Sur y Andalién (periodo 2001-2018)



Original serie and Lineal model for Andalién station

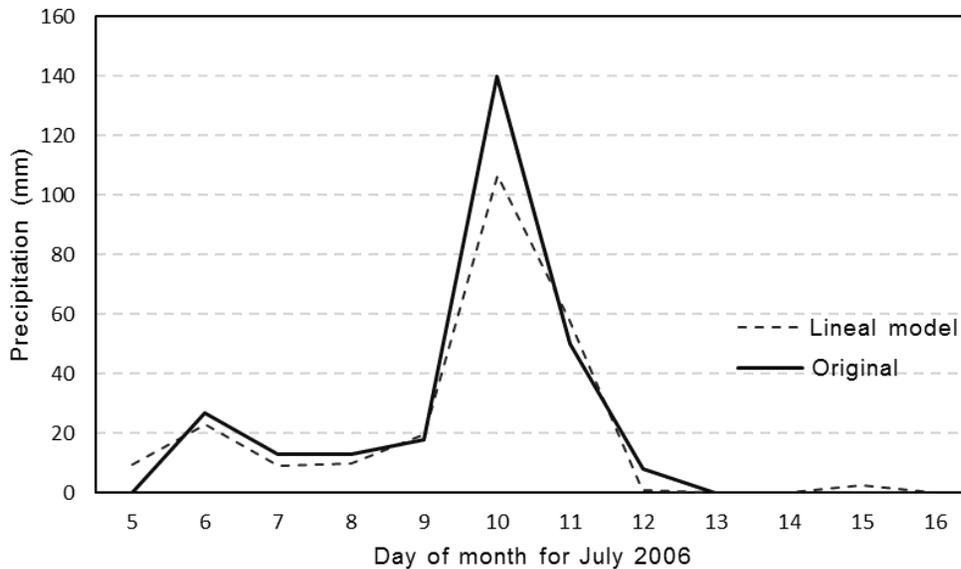


Figura 5 Comparación entre serie derivadas de datos originales (línea negra) y modelo lineal (línea segmentada) para la estación Andalién durante evento de julio 2006.

Los índices Rx1day, Rx2day y Rx5day se calcularon a partir de la serie extendida de la estación "Andalién". Luego, al analizar estadísticamente el comportamiento de estos índices, se obtuvo un ranking de distribuciones para cada conjunto de datos, eligiendo una de las que mejor se ajustaba según la prueba K-S y utilizando la distribución más usual en el análisis de datos hidrológicos (por ejemplo, Gamma, Pearson tipo 3, Valor Extremo Generalizado, Gumbell, Weibull, entre otras) como recomienda Cunnane (1989).

Los índices Rx1day y Rx5day se ajustaron mejor a la distribución del valor extremo generalizado (GEV) y el índice Rx2day a la distribución de Weibull (3P). El estadístico K-S de cada función, los valores p correspondientes y valor crítico figuran en la Tabla 3. Aquí se puede ver que cada estadístico es menor que el valor crítico, con $\alpha = 0,01$ y $n = 71$. Esto indica que las tres distribuciones se ajustan a los datos de precipitación. Cabe señalar que estas distribuciones también superaron las pruebas Chi-Cuadrado y Anderson-Darling.

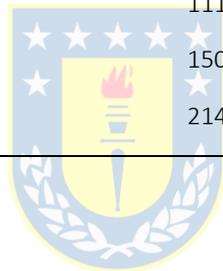
Tabla 3 Resultados de análisis estadístico para la selección de la mejor distribución para cada Rxday asociados al evento de julio 2006.

Estación Andalién / Índice	Mejor ajuste de Distribución	Ranking Test K-S	Test K-S Calculado	P-Value	Valor Crítico ($\alpha = 0.01$)
Rx1day	Gen. Extreme value	1	0.05534	0.97316	
Rx2day	Weibull (3P)	2	0.05426	0.97771	0.19034
Rx5day	Gen. Extreme value	4	0.07105	0.84097	

Estos resultados indican que estas distribuciones son representativas del comportamiento de la precipitación acumulada. Estas distribuciones de precipitación seleccionadas (Figura 6) se utilizaron para calcular los percentiles 90, 95 y 99 (ver Tabla 4), con el fin de identificar eventos de precipitación intensa en las proyecciones climáticas.

Tabla 4 *Porcentajes de excedencia para cada Rxday en los percentiles 90, 95 y 99.*

Estación	Index	Perc. 90% (mm)	Perc. 95% (mm)	Perc. 99% (mm)
Andalién	Rx1day	121.0	141.1	191.7
	Rx2day	161.5	180.7	219.2
	Rx5day	230.5	254.1	299.4
Carriel Sur	Rx1day	111.8	130.4	177.3
	Rx2day	150.6	165.5	189.2
	Rx5day	214.8	232.1	257.4



Según las distribuciones obtenidas en Andalién, el evento de 2006 se encuentra dentro de los percentiles 90 y 95 (ver Tabla 5). Por su parte, las descargas/caudales asociados a la precipitación corresponden a un periodo de retorno de 66 años, es decir, una probabilidad de excedencia del 1,5% o un percentil del 98,5, considerablemente superior al representado por la precipitación (Link et al., 2019). Esta diferencia puede estar relacionada con factores que ocurren en la subcuenca, desconocidos para nosotros y que escapan al alcance de este trabajo.

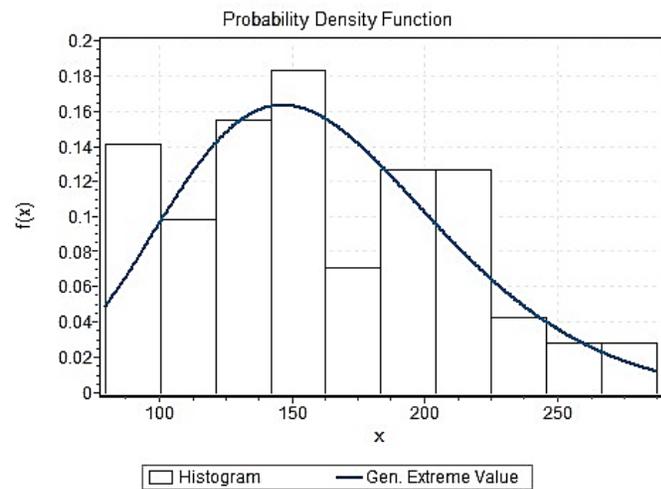
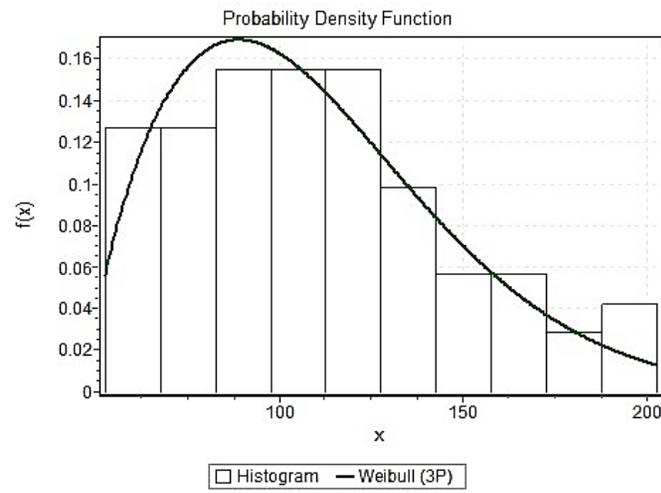
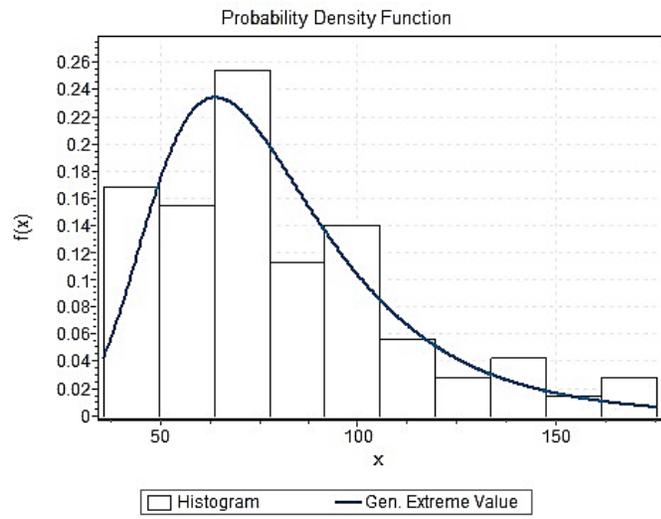


Figura 6 PDF y mejor distribución., de arriba a abajo, para Rx1day, Rx2day y Rx5day, respect.

Tabla 5 Excedencia de acuerdo con las distribuciones calculadas para los registros de la estación Andalién durante el evento de julio 2006.

Estación	Tiempo de acumulación (días)	Precipitación (mm)	Percentil (%)	Excedencia (%)	Periodo de Retorno (años)
			CDF		
Andalién	1	140	95	5	20
	2	158	89	11	9
	5	234	90	10	10

Como se mencionó en la sección 2.3, el caudal futuro provino de la precipitación modelada calculada en base a un modelo lineal entre la precipitación registrada en la estación "Andalién", y el caudal registrado en la estación "Andalién Camino a Penco" en el otoño-invierno de 2006 y el spin-up de la subcuenca, que corresponde a 48 horas. El resultado del modelo lineal arrojó un coeficiente de determinación de 0,56 ($R^2 = 0,56$).



3.2. Validación del modelo con respecto a *Water Index (WI)*.

La Figura 7a y Figura 9 muestran que para la simulación que utiliza ASTER GDEM, el resultado está influenciado por el ruido contenido en la base ráster (segmentación o moteado) donde se generan parches de acumulación de agua, patrones muy diferentes a los resultados obtenidos utilizando WI, dejando al río Andalién sin influencia aparente en las zonas inundadas. Así, esta simulación arroja como superficie inundada un 9 % del dominio espacial en el que la zona urbana cubre sólo el 19 % del mismo. De este 19 %, sólo el 14,4 % resulta inundado en esta simulación. A lo que, considerando el cuadrante SO (zona

relevante por contener el 70,2 % de la superficie urbana total de nuestro dominio espacial) la inundación alcanza el 15,4 % de su propia superficie urbana.

De acuerdo con lo obtenido a partir del índice WI (Figura 8a), el 25,7 % del área fue identificada como agua en el momento de la captura del satélite en el dominio espacial. Considerando sólo la zona urbana, la inundación alcanza el 17 % de esta cobertura (ver Figura 8b). Del mismo modo, la inundación sobre la zona urbana, pero ahora limitada al cuadrante suroeste (SW), alcanza el 16,4 %.

Por otro lado, la simulación que utiliza el DEM LiDAR (ver Figura 7b y Figura 10) muestra un área inundada con patrones similares a los obtenidos de WI en las proximidades del río Andalién. Donde la simulación indica que el 8,5% del dominio espacial está inundado. A su vez, considerando sólo la cobertura urbana, la inundación cubre el 9% de esta área. Luego, considerando la zona urbana del cuadrante SO, la inundación alcanza el 9,2%.

Sin embargo, y a pesar de que los porcentajes son inferiores a los obtenidos en nuestra referencia (WI), es importante señalar que los límites y las zonas inundadas en esta simulación están mejor definidos, son homogéneos, responden a la topografía local y no están desacoplados del curso del río como en la simulación A. Por lo tanto, esta experimentación parece ser mejor y más consistente para analizar eventos de naturaleza local, en comparación con el modelo que utiliza DEM global en la simulación A. Por el contrario, los índices de Rendimiento (ver sección 3.3, tabla 6) calculados entre WI y los modelos

implementados para las simulaciones A y B muestran un bajo rendimiento y valores similares para ambas simulaciones.

A su vez, para simulaciones en zonas correspondientes a arroyos ocultos por vegetación alta, el modelo que utiliza como base el DEM LiDAR es capaz de mostrar acumulación de agua en estas zonas, lo que podría ser correcto, pero supone una sobreestimación de la superficie de agua respecto al WI, aumentando las diferencias absolutas entre ambos conjuntos de datos. Sin embargo, este problema puede soslayarse trabajando sobre el suelo urbano del dominio espacial correspondiente.

Todas estas fuentes de incertidumbre repercuten en el resultado de los índices de Rendimiento entre los datos simulados y los de referencia (WI), mostrados en el apartado 2.4.



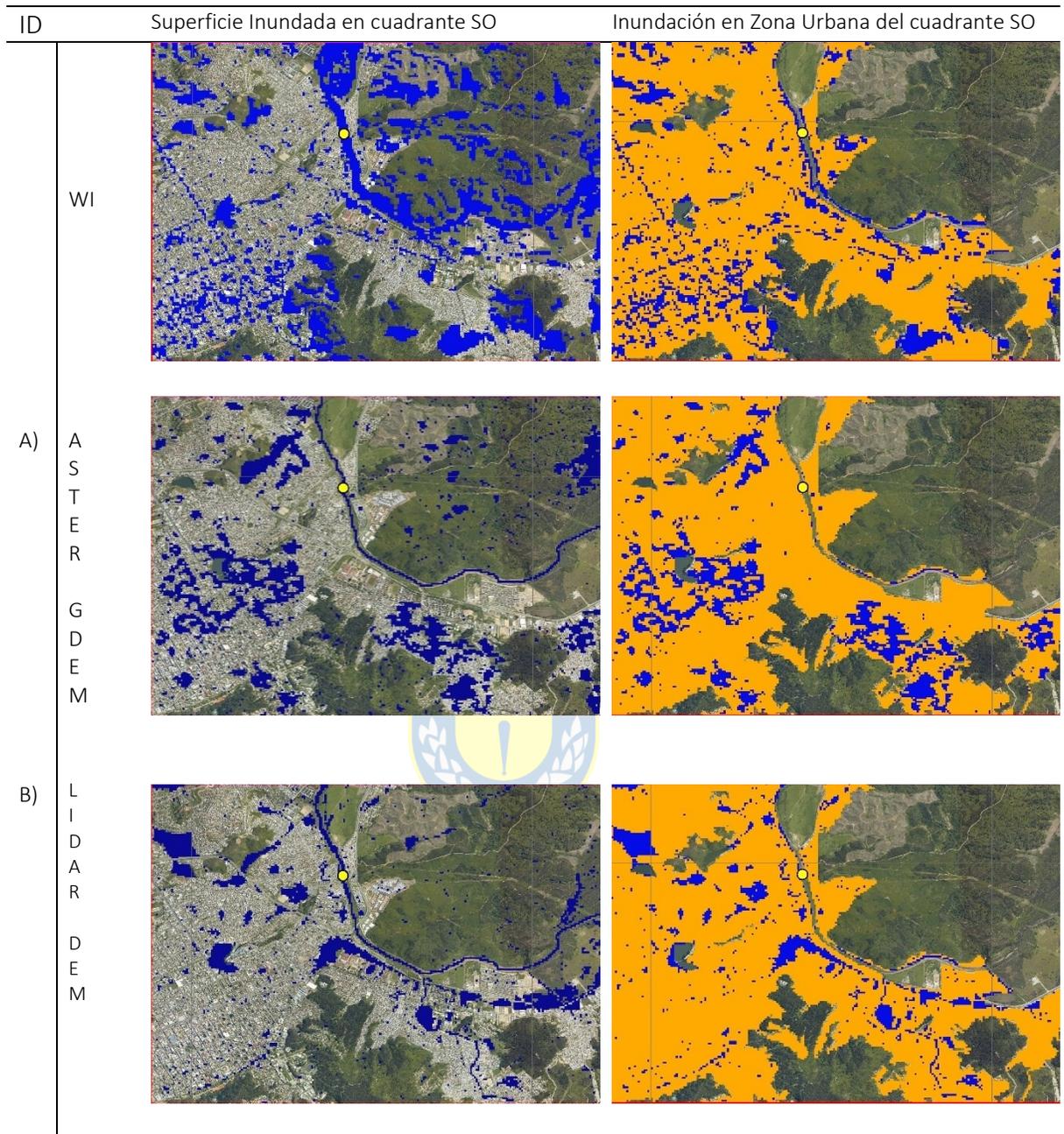


Figura 7 Comparación entre WI y simulaciones con LFP model usando diferentes DEMs a) ASTER GDEM y b) LiDAR MINVU (2013). En la columna derecha, el amarillo indica terrenos urbanos secos y el azul indica terrenos urbanos inundados. Las salidas del modelo LFP corresponden exactamente al instante en que el satélite capturó los datos utilizados en la cálculo de WI.

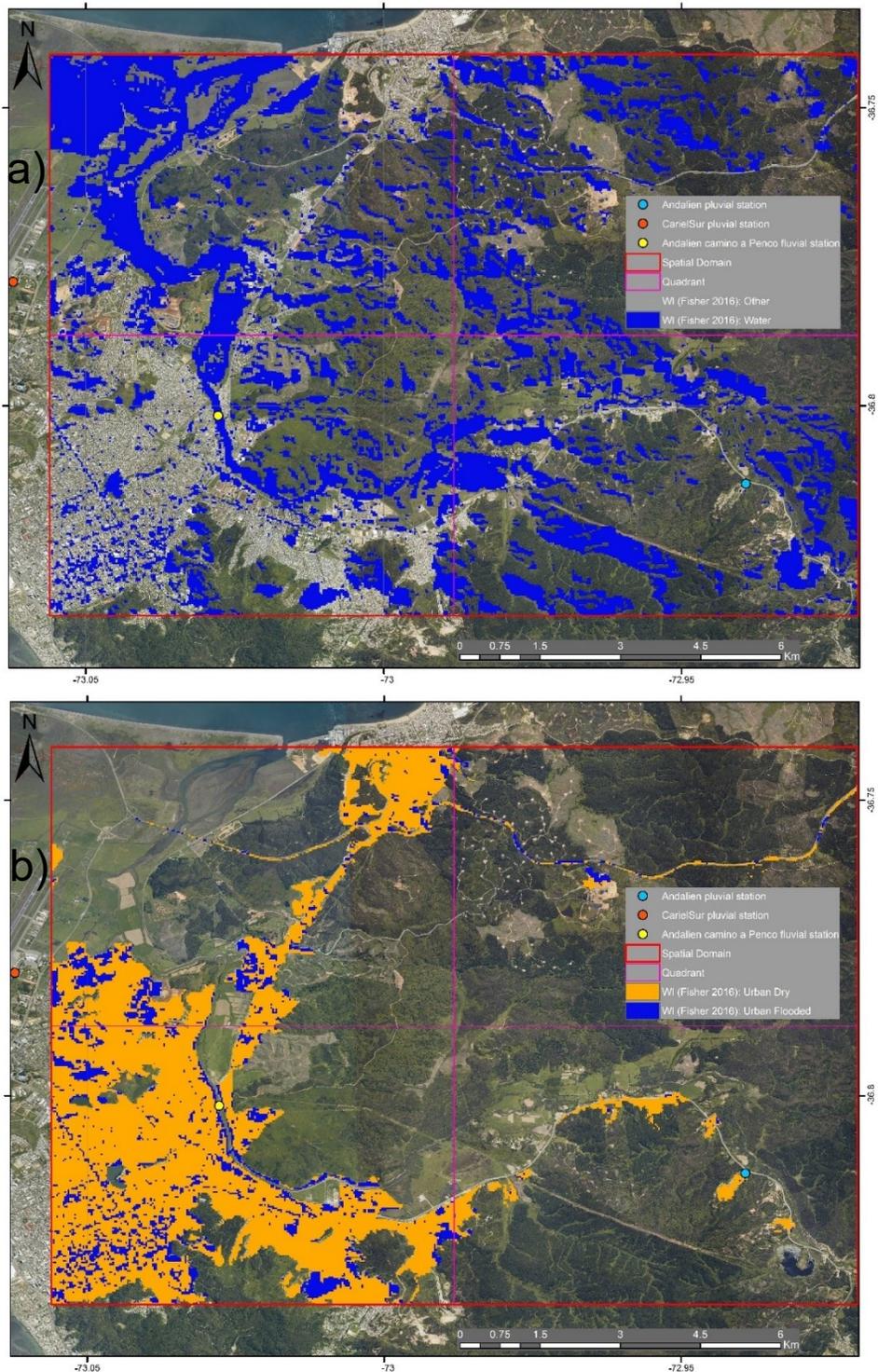


Figura 8 Resultados de Water Index (W) en el dominio espacial completo 8a) y sobre la cobertura urbana intersecada con WI 8b).

Los resultados obtenidos de las simulaciones futuras se compararon con la extensión máxima de la inundación calculada a partir de la simulación de 2006 utilizando el DEM LiDAR. Se estima que la inundación en su máxima extensión alcanzó el 27% de todo el dominio espacial y el 40% de la cobertura urbana del área de estudio (ver Figura 11). Además, estos resultados mantienen similitudes espaciales con los trabajos de Vidal and Martel (2007), Vidal and Romero (2010) y Link et al. (2019).

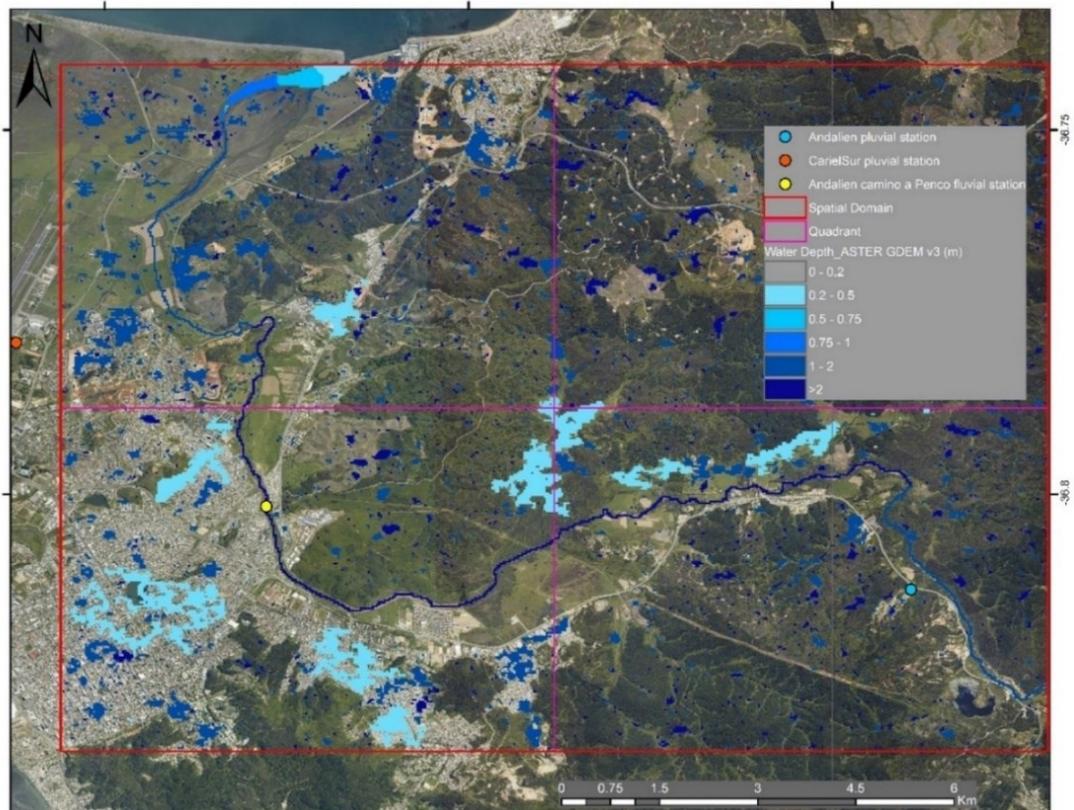


Figura 9 Profundidad de agua a partir de modelo LFP implementado usando ASTER GDEM, instante comparable al paso del satélite en que se obtuvo la imagen para calcular WI.

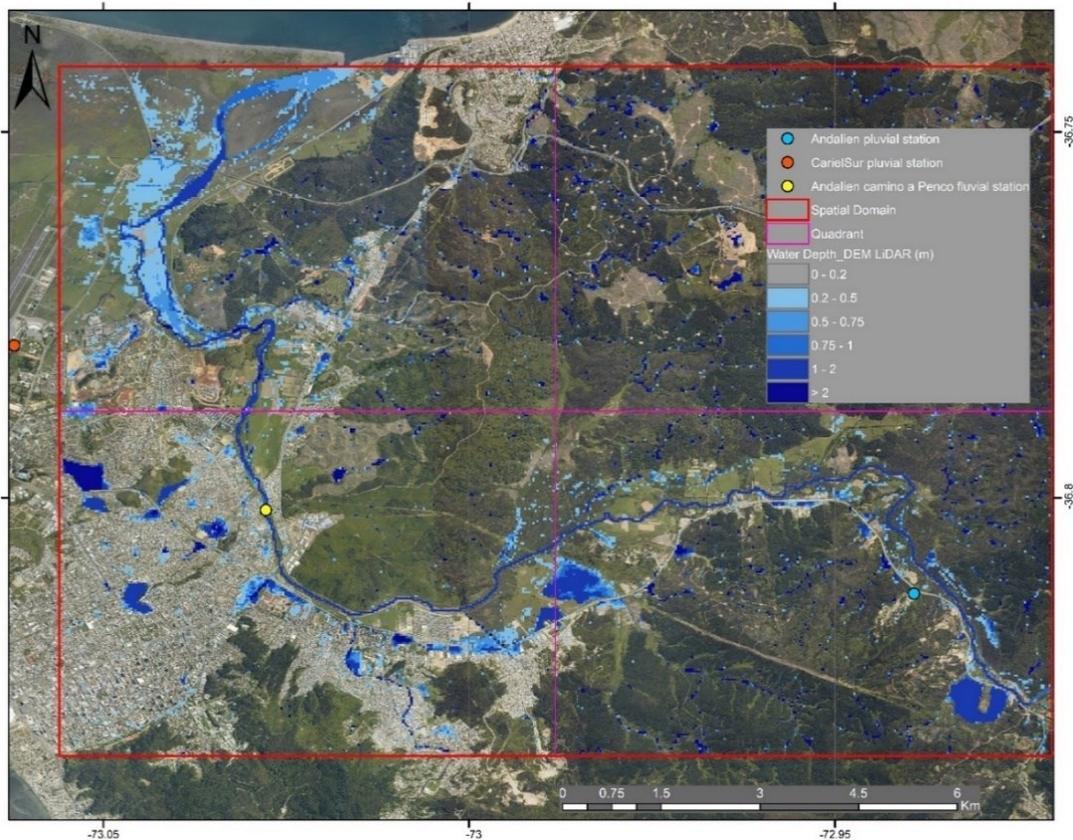


Figura 10 Profundidad de agua a partir de modelo LFP implementado usando LiDAR DEM MINVU, instante comparable al paso del satélite en que se obtuvo la imagen para calcular WI.

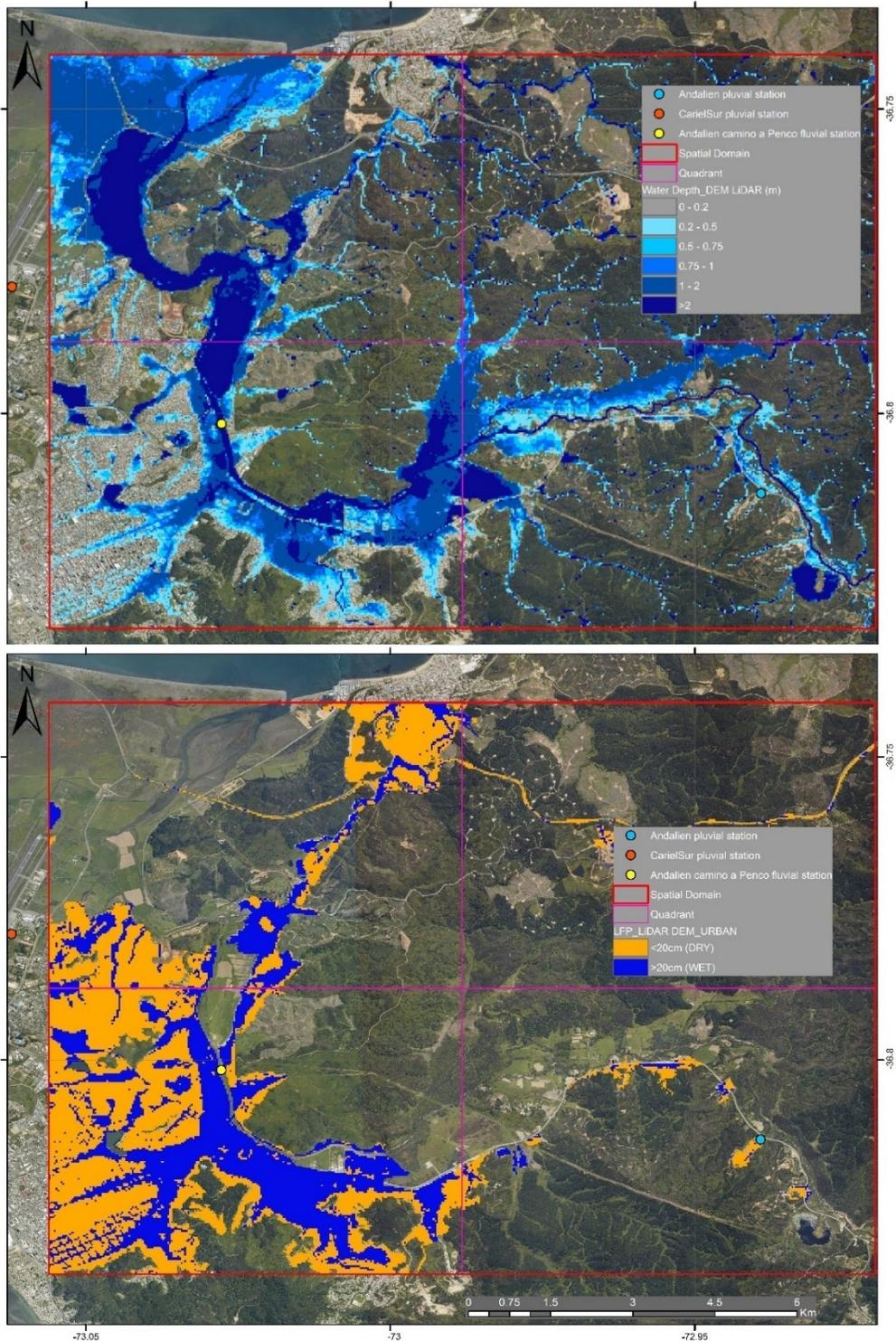


Figura 11 Área máxima inundada para evento de 2006 a partir de modelo LFP implementado (LiDAR DEM). Arriba se muestra todo el dominio espacial mientras que abajo solo considera el área urbana.

3.3. Índices de Rendimiento

El cuadrante seleccionado para la evaluación (cuadrante SO) contiene el 70% del área urbana presente en el dominio espacial utilizado en las simulaciones, y a su vez corresponde al área más relevante en términos de población, ya que incluye parte importante de la ciudad principal (Concepción) dentro del Área Metropolitana del Gran Concepción. El resultado de los índices para el cuadrante SO se muestra en la Tabla 6 para cada simulación realizada considerando el evento 2006, utilizando DEM ASTER GDEM v3 y DEM LiDAR (MINVU, 2013) donde ambos fueron comparados con lo obtenido en el WI (Benchmark).

Tabla 6 Índices de similitud, para el cuadrante SW del dominio espacial, usando diferentes DEMs respecto del resultado de WI.

Cobertura Urbana limita a:	Simulación según DEM:	Hit Rate (HR)	False Alarm Ratio (FAR)	Critical Success Index (CSI)	Error Bias (EB)
Dominio Espacial Completo	ASTER GDEM v3	0.15	0.82	0.09	0.45
	LiDAR MINVU 2013	0.13	0.75	0.10	0.31
Cuadrante SO	ASTER GDEM v3	0.17	0.82	0.10	0.48
	LiDAR MINVU 2013	0.14	0.76	0.10	0.33
Cuadrante NO	ASTER GDEM v3	0.14	0.80	0.09	0.39
	LiDAR MINVU 2013	0.13	0.69	0.10	0.25

En el cuadrante SW, que abarca el mayor porcentaje de cobertura urbana, la tasa de acierto (HR) oscila entre 14% y 17%, el error de sesgo (EB) se encuentra entre 33% y 48%. Ahora bien, teniendo en cuenta las falsas alarmas, las simulaciones en el cuadrante SW alcanzan sólo el 10% para ambas simulaciones (ASTER GDEM y DEM LiDAR).

3.4. Comparación con los registros ciudadanos.

Ante la imposibilidad de obtener datos de levantamientos históricos o de recopilar información propia sobre la altura de las inundaciones en la zona urbana de Concepción, y con el fin de complementar la evaluación realizada mediante índices de Rendimiento, se recopiló un conjunto de registros audiovisuales ciudadanos provenientes de sitios web y de la fototeca del MOP (proporcionados por personal de la Dirección de Planificación del MOP Biobío) correspondientes a los días 11, 12 y 13 de julio de 2006. Es decir, se clasificaron los registros entre el primer y tercer día de inundación. En este contexto, se estimó la altura de agua para 10 puntos dentro de la ciudad, algunos de los cuales fueron interpretados como secos o no inundados para encontrar falsos positivos, ver Figura 12 y Figura 13. La estimación de la altura del agua se basó en las dimensiones de diversos elementos como automóviles, grifos, aceras, árboles, personas y otros presentes en las imágenes. Los detalles de la comparación se muestran en la Tabla 7.

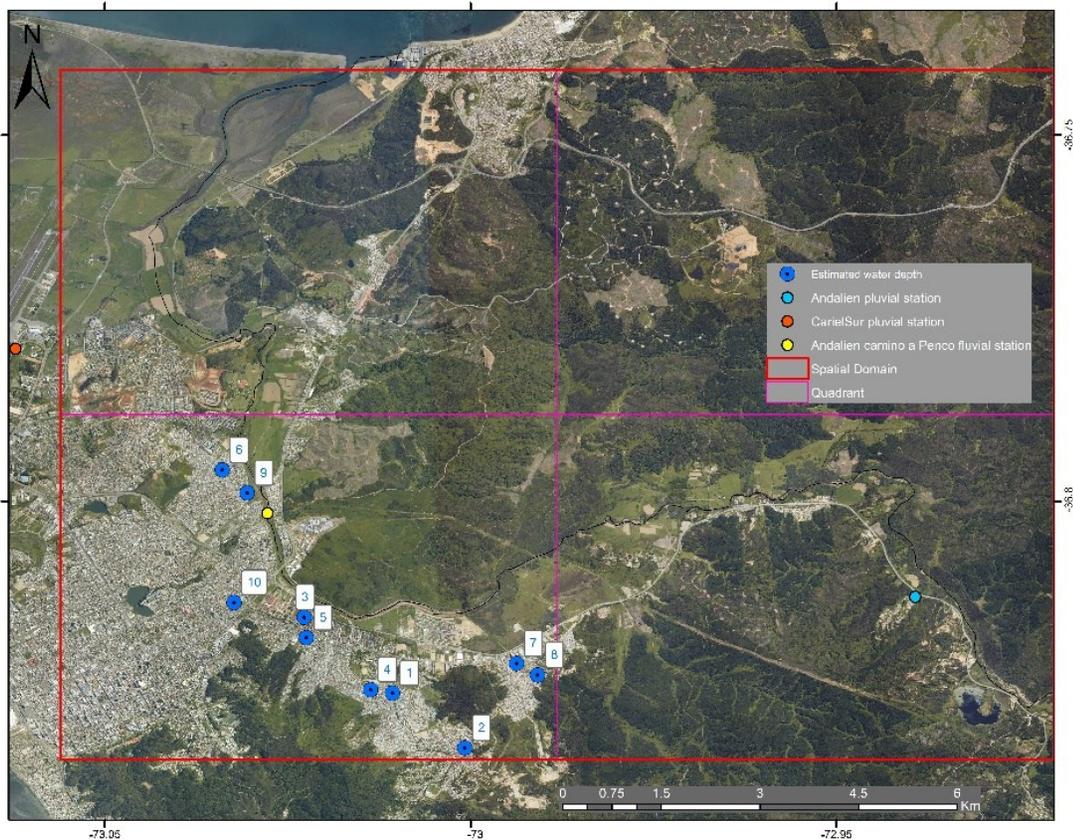


Figura 12 Localización de registros ciudadanos utilizados para la estimación de alturas de agua al momento de la inundación de 2006.

ID	Imágenes inundación de referencias (2006).	Situación actual (fuente: Google maps 2022)	Fuente imágenes de 2006
1			<p>Captura de pantalla de grabación de video de CollaoTV, canal de youtube, visitado 2022-08-15.</p> <p>https://youtu.be/anNDK13gEEc?t=940</p>
2			<p>Fotografía de Danilo Ulloa, publicada por Radio Nonguen Online, visitada el 2022-08-15.</p> <p>http://inundacion2006.blogspot.com/2006_07_09_archive.html#:~:text=INUNDACION%202006%20PARTEhttp://photos1.blogger.com/blogger/7610/1506/1600/julio11-20060021.jpg</p>

3			<p>Fotografía Radio Bíobio (BBCL), visitada el 2022-08-15.</p> <p>https://www.biobiochile.cl/noticias/2014/03/23/concepcion-demanda-contra-el-estado-por-inundaciones-de-2006-en-collao-se-encuentra-paralizada.shtml</p>
4			<p>Captura de pantalla de la grabación de vídeo de M. Castro, canal de youtube, visitado el 2022-08-15.</p> <p>https://youtu.be/muQgzDm9-i4?t=3</p>
5			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>

6			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>
7			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>
8			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>

9			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>
10			<p>Imágenes de archivo Ministerio de Obras Públicas (MOP).</p>

Figura 13 Registros ciudadanos (bibliografía gris) utilizados para la estimación de altura de agua durante la inundación de 2006. Los puntos azules indican puntos homólogos entre imágenes de archivo y las actuales.

Tabla 7 *Altura de agua durante la inundación de 2006 estimada a partir de registros ciudadanos y comparado con la altura máxima de agua derivada de los modelos LFP implementados utilizando diferentes DEMs.*

ID	Ubicación de referencia (nombre de calle(s) o intersección, sector)	Fecha	Longitud	Latitud	Altura de agua estimada desde imágenes de 2006	ASTER GDEM Altura máxima de agua	DEM LiDAR Altura máxima de agua
1	Calle 2 con Pasaje 12-A, villa Los Fresnos, Nonguén	2006-07-11	73° 0'38.42"O	36°49'34.46"S	>0.600m	1.360m	0.660m
2	Las Azucenas con Independencia, Nonguén	2006-07-11	73° 0'2.84"O	36°50'1.41"S	>0.700m	1.450m	0.190m
3	Between Estadio & Terminal de Buses Collao	2006-07-12	73°1'21.92"O	36°48'57.15"S	>0.500m	0.420m	1.220m
4	Gorostiaga con Rafael de la Sota, Los Lirios	2006-07-12	73° 0'49.21"O	36°49'32.77"S	>0.500m	1.930m	1.230m
5	Gral. Novoa con Atacalco, Collao	2006-07-12	73° 1'20.81"O	36°49'7.20"S	<0.200m	1.220m	0.990m
6	Av. Andalién, Bellavista	2006-07-12	73° 2'2.23"O	36°47'44.74"S	<0.200m	0.010m	0.070m
7	21 de mayo con Giacaman, Palomares	2006-07-12	72°59'37.35"O	36°49'19.89"S	>0.700m	1.880m	1.290m
8	Los Álamos con Los Andes, Palomares	2006-07-12	72°59'26.98"O	36°49'25.54"S	<0.200m	0.010m	0.080m
9	Cardenio Avello con Las Heras	2006-07-12	73° 1'50.02"O	36°47'56.02"S	>0.600	1.010m	1.960m
10	Nueve de marzo, Bellavista	2006-07-12	73° 1'56.45"O	36°48'49.93"S	>0.400	1.340m	1.670m
	Promedio	-	-	-	-	0.603m	0.476m
	Root Mean Square Error (RMSE)	-	-	-	-	0.821m	0.760m

En general, los valores obtenidos en las simulaciones arrojan resultados similares respecto a la altura de agua estimada para las 10 localizaciones indicadas en la Tabla 7; excepto para los puntos 2 y 5 donde los valores sí se desvían del valor estimado. En promedio ASTER GDEM arrojó alturas 0.603m superiores a las estimadas por ciencia ciudadana y DEM LiDAR de 0.476m también superiores a las estimadas para los registros de referencia, por otro lado, el RMS fue de 0.821m y 0.760m, respectivamente. El valor RMS se asumirá como incertidumbre en las inundaciones desencadenadas por eventos futuros identificados en el conjunto de datos WRF-CESM, inclinándose por utilizar el modelo que utiliza la base raster LiDAR en vista de los mejores resultados.

3.5. Simulaciones con precipitaciones futuras procedentes de WRF-CESM



Expuestas las desventajas de utilizar un DEM global (ver sección 3.2), los resultados obtenidos en los índices de Rendimiento y las alturas de agua obtenidas en cada modelo implementado (Figura 9 y Figura 10), se decidió optar por el modelo que utiliza el DEM LiDAR (MINVU, 2013) como base ráster para realizar las simulaciones utilizando la salida climática del WRF-CESM. Este DEM, según nuestro criterio, proporcionaba una mayor certeza en cuanto a los patrones de esorrentía, así como a las alturas del agua en el área urbana (sección 3.4), siendo más consistentes con los esperados a partir de las observaciones.

Aplicando las excedencias calculadas para 1, 2 y 5 días de la serie de precipitación de la estación de Andalién (ver Tabla 5, apartado 3.1), fue posible buscar eventos equivalentes o superiores al de 2006 para mediados y finales de este siglo. Para ello, se consideraron los 2 píxeles WFR-CESM que cubren casi por completo el dominio espacial del estudio, que además se solapan con las posiciones de las estaciones de Andalién y Carriel Sur. Todos los eventos identificados superaron la excedencia para 5 días de precipitación acumulada, no hubo eventos por encima de las excedencias definidas para 1 o 2 días en los periodos analizados, sólo se identificó un evento para 2045, y 2 eventos para 2100. Sin embargo, estos dos últimos eventos sólo estaban separados por aproximadamente una semana, por lo que se decidió analizarlos también como un gran evento. Así pues, había 4 eventos para simular (véase la Tabla 8).

Tabla 8 Eventos futuros identificados desde WRF-CESM.

Evento identificado	Año	Fecha inicio	Fecha fin	Rxday Excedido	Precipitación mínima	Precipitación máxima	Observación
A	2045	May-14	May-19	Rx5day	79.3	250.4	Sobre 90% de excedencia
B	2100	May-08	May-19	Rx5day	232.3	442.2	Sobre 99% de excedencia
C	2100	May-26	Jun-03	Rx5day	238.8	281.2	Sobre 95% de excedencia
B & C	2100	May-08	Jun-03	Rx5day	232.3	442.2	Sobre 99% de excedencia

La Figura 14 muestra los resultados de las simulaciones del LFP con datos del WRF-CESM. A primera vista, los eventos simulados cubren menos superficie que las inundaciones de 2006 (véase Tabla 9). La mayor resolución temporal (cada

6 horas) podría implicar una mejor representación de los cambios en la dinámica de precipitaciones e inundaciones, haciéndolos menos bruscos que las simulaciones del evento de referencia. Por otro lado, todos los eventos futuros se corresponden con la excedencia de 5 días en la precipitación, tal y como se ha calculado a partir de los datos históricos, lo que dista mucho de la rápida respuesta documentada para la subcuenca del Andalién en el evento de referencia.

Para comprender en términos relativos los futuros eventos en comparación con el evento de referencia, se calculó el índice de aciertos (HR), y dado que todos los parámetros de la simulación, excepto la precipitación y el tiempo de la simulación en sí, eran los mismos, resulta innecesario calcular los demás índices de Rendimiento, ya que serían iguales a cero.

Así, los eventos futuros identificados tienen una dimensión de superficie menor que el evento de referencia. Para el evento de mediados de siglo, los porcentajes de aciertos sólo alcanzan el 67%, y entre el 69% y el 76% para los eventos futuros de finales de siglo, teniendo en cuenta todo el dominio espacial de este estudio. Ahora bien, si consideramos únicamente la zona urbana, el evento de mediados de siglo alcanza el 53%, y entre el 55% y el 63% para los eventos de finales de siglo. No hay diferencias significativas si nos limitamos al cuadrante SO, que contiene el mayor porcentaje de área urbana de todo el dominio espacial, siempre con respecto al evento de 2006 (ver Tabla 9).

Además de las altas correlaciones de los eventos futuros identificados con los calculados para el evento de 2006, éstos cubren un porcentaje considerable de todo el dominio espacial, pero al mismo tiempo, considera un área considerable que se encuentra dentro del rango de incertidumbre definido por el RMS.

Los resultados muestran que el evento de mediados de siglo inunda el 17,9% de todo el dominio espacial, y entre el 18,6 y el 20,4% a finales de este siglo. Cuando consideramos sólo la cobertura urbana, las inundaciones futuras muestran que el evento de 2045 alcanzará el 20,9% de esta zona, en contraste, entre el 21,9% y el 25,1% para 2100. Sin embargo, cuando comprobamos qué porcentaje de la cobertura urbana inundada está dentro de la incertidumbre definida por el RMS para el modelo LFP aplicado, el área está por encima del 70% para todos los eventos futuros identificados (ver Tabla 10).

Todas las áreas inundadas coinciden fuertemente con las afectadas por el evento pluviométrico de 2006, véase Vidal and Romero (2010). Las zonas fuera del margen de incertidumbre se corresponden entre sí, así como con el evento de referencia. En este contexto, los sectores inundados incluyen las riberas del río Andalién y lagunas dentro del radio urbano, así como otros parches importantes de la ciudad de Concepción como Collao, Palomares, Chillancito, Lomas de San Andrés, Villa San Valentín, Las Monjas, Barrio Norte, Villa CAP; también, La Greda y Cosmito, ambos en el camino a Penco, Pedro de Valdivia y el centro de la ciudad de Penco.

Tabla 9 Comparación de eventos futuro respecto del evento de referencia (de julio 2006).

Evento identificado	Año	Hit Rate (HR) respecto del evento de 2006 para el Dominio Espacial Completo	Hit Rate (HR) solo de la cobertura Urbana en todo el Dominio Espacial	Hit Rate (HR) de la cobertura Urbana solo para el cuadrante SO
A	2045	0.67	0.53	0.51
B	2100	0.76	0.63	0.61
C	2100	0.69	0.55	0.53
B & C	2100	0.76	0.63	0.61

Tabla 10 Porcentajes de áreas inundada para cada evento de futuro

Evento identificado	Año	Área inundada para el Dominio Espacial Completo (%)	Área inundada solo para la cobertura Urbana del Dominio Espacial (%)	Área Inundada considerando una altura de agua entre 0.2 m and 0.2+ RMS (e.i., 0.96 m), dentro de solo la cobertura urbana de todo el Dominio Espacial (%)
A	2045	17.9	20.9	74.1
B	2100	20.4	25.1	72.4
C	2100	18.6	21.9	73.8
D (B & C)	2100	20.4	25.1	72.4

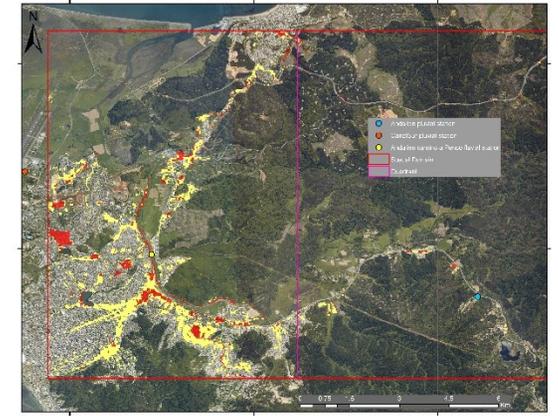
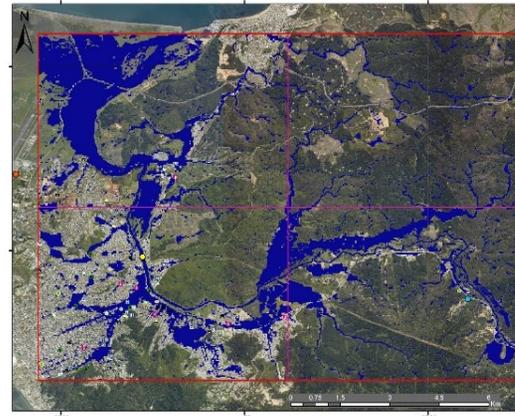
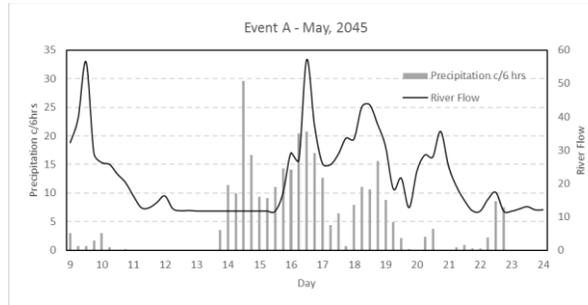
Evento

Precipitación y Caudal para evento futuro

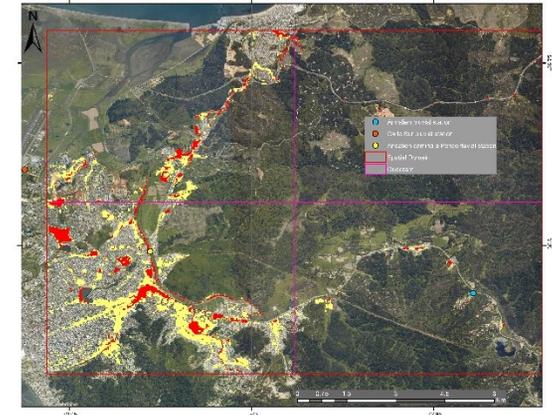
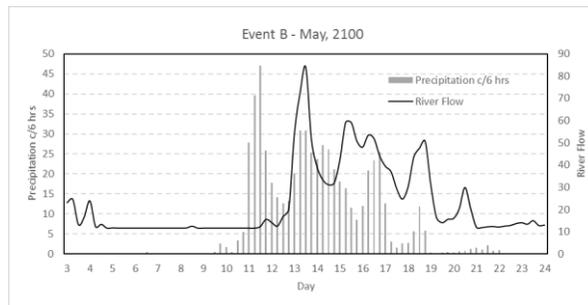
Máxima área inundada por evento

Máxima área inundada en la cobertura urbana

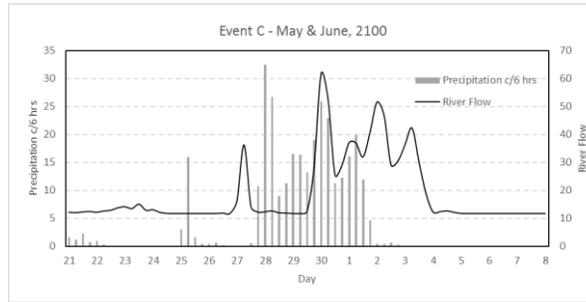
A



B



C



D

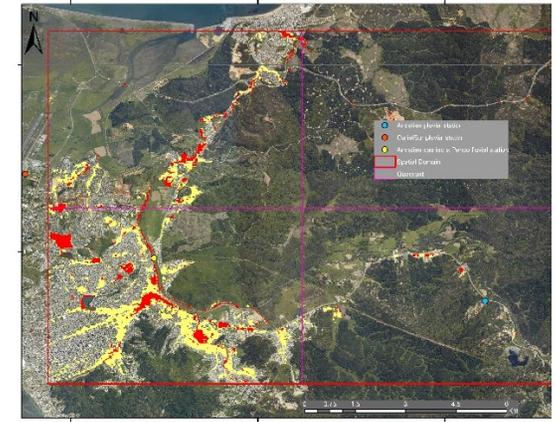
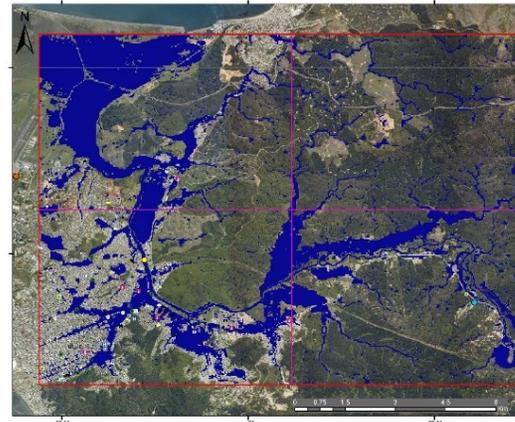
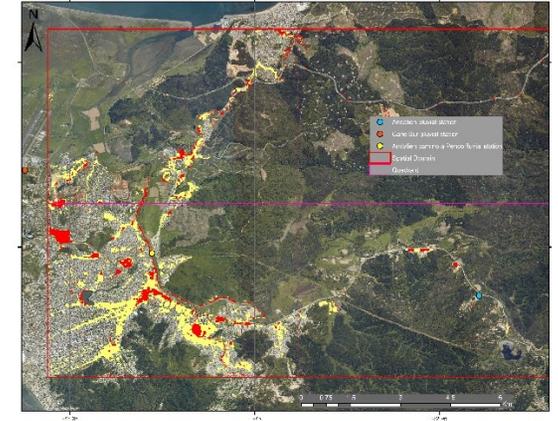
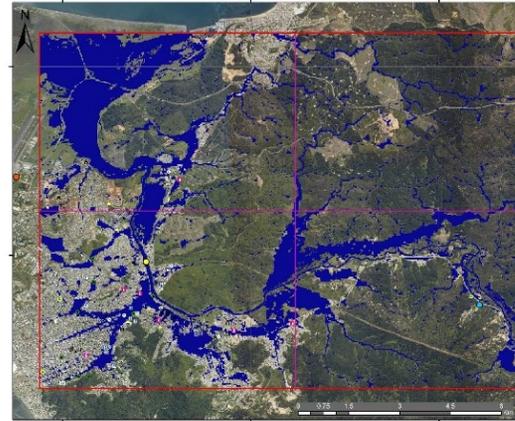
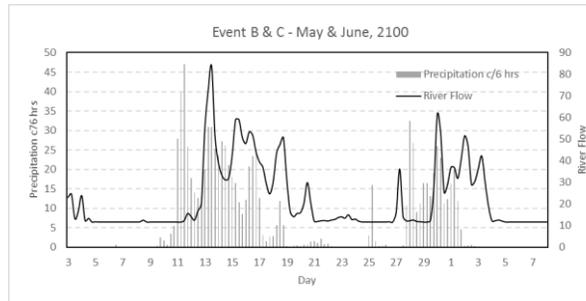


Figura 14 De arriba a abajo, salida del modelo LFP para eventos futuros. A la izquierda, el registro de precipitación y caudal; en el centro, la superficie máxima inundada de todo el dominio espacial y, a la derecha, en amarillo el suelo urbano inundado en el rango de 0,2m a 0,2+RMS (0,96m) y en rojo la inundación superior a 0,96m.

4. DISCUSIÓN

Este estudio implementó y probó el modelo LFP para evaluar los efectos que futuros eventos extremos de precipitación podrían tener en el área urbana de la parte baja de la subcuenca del río Andalién, considerando el escenario RCP8.5. Los resultados muestran que las inundaciones resultantes de estos eventos futuros podrían ser de características similares, pero menos extensas en comparación con el evento de 2006. También, es importante mencionar que los eventos identificados en los datos futuros del conjunto WRF-CESM para los periodos 2045-2050 y 2095-2100 se desarrollan en periodos más largos (5 días o más) que el evento de referencia de 2006 (~2 días).

Las proyecciones de inundaciones futuras muestran, en promedio, que el 72% del área máxima afectada en 2006 se inundará en el futuro, y el 59% en el sector urbano del dominio espacial. Estos resultados pueden considerarse una subestimación, ya que los índices de Rendimiento aplicados en nuestro intento de validar este modelo local se utilizan habitualmente para estudios a escala regional, por lo que el resultado no fue el más óptimo.

El uso de fuentes de datos globales de elevación del terreno para estudios de inundaciones es prácticamente un estándar dado su libre acceso y amplia cobertura. Sin embargo, hoy en día es más frecuente obtener detalles de mejor resolución a partir de otro tipo de sensores, como los UAV que aplican técnicas como la *Structure from Motion* (sfM), sensores LiDAR aerotransportados (ALS) o

terrestres (TLS), por ejemplo, Annis et al. (2020); Cook and Merwade (2009); Langhammer (2019); Schumann et al. (2019), entre otros, especialmente útiles en zonas urbanas con un historial de eventos extremos. Esto abre una oportunidad para evaluar tales (nuevos) conjuntos de datos, incorporarlos a modelos hidrológicos ya implementados o calibrar otros nuevos. Nuestra evaluación adicional empleando una interpretación de las profundidades del agua a lo largo de puntos discretos de la ciudad a partir de registros ciudadanos como fotografías y vídeos (ciencia ciudadana), indicó que el mejor modelo LFP procedía del uso de la base ráster LiDAR. A pesar de que estos datos no se utilizaron en su resolución espacial original, sino agregados al tamaño del ASTERGDEM, el DEM derivado de LiDAR mantuvo una mejor representación del terreno y, en consecuencia, el desarrollo de una dinámica pluvial y fluvial más realista/adecuada de un evento de inundación sobre el área de estudio.

Sin embargo, tanto el WI como el modelo, principalmente este último, son consistentes con la extensión de inundación interpretada a partir de fotografías aéreas del evento de inundación de referencia proporcionadas por el Ministerio de Obras Públicas, junto con la cartografía reportada por Vidal and Martel (2007), Vidal and Romero (2010) y Link et al. (2019). Por otro lado, es necesario recordar las limitaciones del WI para la cartografía del agua, limitación atribuida principalmente a la turbidez presente en inundaciones o crecidas repentinas, lo que lleva a tomar dicha referencia con cautela (Fisher et al., 2016). Otro problema importante al aplicar el índice WI es la identificación de áreas inundadas, que

podrían contener solo una cantidad mínima de agua, por debajo del umbral de 20 cm considerado en este trabajo, sobreestimando el número de píxeles húmedos y alterando los índices de Rendimiento que incorporan falsos negativos.

La habilidad del modelo con respecto al WI no fue significativamente alta, probablemente porque los índices de Rendimiento son demasiado sensibles a la aparición de zonas de inundación parcheadas, como en el caso de la salida del modelo LFP y el WI. Varios autores, indican que las inundaciones a escala local son más sensibles a las variaciones topográficas a pequeña escala (Wing et al., 2019; Wing et al., 2017). Es decir, existe una mayor dificultad para aislar las falsas alarmas, lo que se ha supuesto en este trabajo. Estas diferencias podrían explicarse por la influencia de las fechas de cada DEM utilizado como entrada en cada simulación, capturando el levantamiento LiDAR obras fluviales y/o modificaciones de cauce realizadas con posterioridad al evento de 2006, lo que para ASTER GDEM también es probable pero no del todo seguro dado el rango de tiempo en que se construyó y metadatos no detallados, por tanto, ambos podrían estar influenciados por el año de producción de los DEM. Por otro lado, existen problemas documentados para ASTER GDEM v3, particularmente sobre áreas urbanas y áreas con alta vegetación como bosques o plantaciones forestales, donde Gesch et al. (2016) indican que se añaden de 1 a 4 metros de elevación positiva sobre las áreas mencionadas.

El análisis global de los índices de Rendimiento nos deja una incertidumbre considerablemente alta para validar nuestro modelo de este modo. Creemos que

en ello influye principalmente el reducido dominio espacial. Estos índices son más adecuados para validar regiones de mayores dimensiones y no se aplican adecuadamente a estudios locales, al menos con la resolución espacial utilizada en estos datos. Teniendo en cuenta lo anterior, fue necesario complementar la validación utilizando un método cualitativo. En este método se utilizaron registros ciudadanos (ciencia ciudadana) para estimar la altura del agua y compararlos con los datos extraídos de los modelos ensayados para la validación, tal y como se explica en el apartado 2.4.

Hasta donde sabemos, este es el primer estudio que entrega proyecciones futuras de inundación en la subcuenca del río Andalién, que afecta directamente a la zona urbana de Concepción. Estos resultados pueden apoyar la toma de decisiones de las autoridades, en particular para mejorar los instrumentos de planificación territorial. Además, esta investigación utiliza un enfoque simple en la implementación del modelo hidrodinámico 2D LISFLOOD-FP que no incorpora aspectos como infiltración, puentes, obstáculos u obras de evacuación de aguas lluvias mejorando con ello los tiempos de evaluación de otros posibles eventos. En la validación del modelo LFP se utilizan registros ciudadanos que mostraron la magnitud del evento de referencia. Esta es una forma de abordar la falta de datos sistemáticos de validación derivados de un plan de acción inexistente y que debería estar previamente definido para registrar este tipo de fenómenos, descrita como un problema por algunos autores como Bates (2022) y Sadeghi et al. (2022).

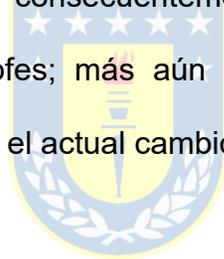
Del trabajo realizado se desprende la necesidad de evaluar los parámetros del modelo implementado para obtener una representación más precisa de la inundación y su dinámica, reduciendo así, por ejemplo, las falsas alarmas. Por otro lado, se destaca la relevancia de implementar modelos hidráulicos bidimensionales, ya que permite considerar no sólo la extensión o altura de la columna de agua, sino también extraer, por ejemplo, la velocidad de flujo, necesaria para definir zonas vulnerables.

Debido a los limitados periodos analizados en el conjunto de datos del WRF-CESM, no es posible asegurar, y tampoco descartar, que se haya dejado fuera al menos un evento de 1 día y otro de 2 días, teniendo en cuenta que la probabilidad de excedencia en los próximos ~30 (mediados de siglo) y ~80 años (finales de siglo) se sitúa en torno al 100% para 1 día y entre el 94% y el 100% para 2 días, respectivamente. Sin embargo, en el caso de un evento de 5 días, la probabilidad de excedencia se estima en un 96% para mediados de siglo y cercana al 100% para finales de siglo, lo que es coherente con el hecho de haber encontrado eventos que reúnen las características del evento de referencia. Lo relevante es que se encuentra más de un evento para finales de siglo a pesar del corto periodo de tiempo considerado en los datos del WRF-CESM. Esto es coherente con aspectos mencionados por el IPCC (2021) sobre la intensificación de los eventos extremos en el futuro y sobre cambios en la probabilidad de ocurrencia tendiendo a ser más concurrentes o a presentar características compuestas entre los propios eventos. Por otro lado, los escenarios de

precipitación extrema para la región requieren de estudios más profundos con más modelos, ya que persiste cierta incertidumbre como resultado de la importancia relativa de la termodinámica y la dinámica climática (Pfahl et al., 2017).

En la actualidad, la ciudad de Concepción continúa su expansión urbana en zonas susceptibles de inundación, como paleocanales y riberas de los ríos Andalién y Biobío, o bordes y rellenos de humedales, como se desprende de la comparación de diversos estudios (De la Barrera & Henríquez, 2017; Link et al., 2019; Munizaga et al., 2022; Pauchard et al., 2006; Rojas et al., 2019; Rojas, Pino, Basnou, et al., 2013; Rojas, Pino, & Jaque, 2013) con las últimas versiones del Plan Regulador Metropolitano de Concepción (MINVU, 2003, 2017a, 2017b). Áreas que funcionarían como Contribuciones de la Naturaleza a las Personas (PNC) (Díaz et al., 2015; Díaz et al., 2018; IPBES, 2019; Pascual et al., 2017) por su alto valor ecológico, preservación de la biodiversidad y mitigación de eventos extremos y otros desastres, aspectos que aparentemente seguirán siendo degradados para crear nuevas áreas habitacionales, entregando áreas insuficientes para la protección frente a eventos de inundación en las riberas y llanura de inundación del río Andalién. Varias de estas áreas ya han sido afectadas durante el evento de 2006 y dados los factores topográficos de la ciudad, continuarán siendo afectadas en el futuro. Esto implica que muchos de los habitantes de la ciudad se ven amenazados por eventos de inundación, aspecto que no es resuelto por las normas del Plan Regulador de la ciudad y

metropolitano. Por el contrario, aparentemente contribuye al hecho de que el número de personas afectadas por inundaciones e inundaciones repentinas continúen aumentando dadas las crecientes tasas de urbanización, cambio de uso del suelo y, aspecto quizás menos evidente, debido a las modificaciones de las redes hidrográficas de las subcuencas involucradas. En este punto, es importante destacar el papel de las autoridades locales y de las agencias gubernamentales, ya que tienen el deber de implementar las medidas necesarias para prevenir los desastres socio-naturales a medida que diseñan una planificación territorial basada en evidencias científicas. Al hacerlo, se convertirá en la herramienta más directa y consecuentemente más efectiva para enfrentar este y otros tipos de catástrofes; más aún cuando los fenómenos se ven influenciados o potenciados por el actual cambio climático.



5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir del modelo hidrodinámico bidimensional LISFLOOD-FP son consistentes con la cartografía de máximas crecidas de 2006 realizada tanto en este estudio mediante *Water Index* así como por otros autores. Por tanto, aunque existen zonas que superan los límites calculados por otros autores, se puede asegurar que esta sobreestimación se encuentra principalmente dentro del área cubierta por la zona de incertidumbre del modelo LFP que se deriva del RMS entre dichas salidas y la altura de agua obtenida de ciencia ciudadana.

Considerando la densidad poblacional de las zonas afectadas, el centro de Concepción precisamente, nos encontramos con que muchas personas están expuestas a esta amenaza desde el evento de 2006. Además, a menos que este asunto se trate adecuadamente, el peligro de inundaciones repentinas permanecerá en estas zonas en el futuro. Sin embargo, dadas las múltiples fuentes de incertidumbre de esta primera implementación del modelo hidrológico LFP en esta zona, se hace importante para futuros estudios, con este u otros modelos, probar la sensibilidad de los parámetros (por ejemplo, coeficiente de rugosidad del *Manning*, tasa de infiltración, y otros) con el fin de generar mayor certeza respecto de los resultados obtenidos.

Dado que los eventos identificados en esta investigación no superan el 76% de la superficie máxima inundada durante 2006, el peligro de inundaciones repentinas en el escenario RCP8.5 disminuye aparentemente con el tiempo. Sin

embargo, es necesario tomar estos resultados con cautela ya que se excluyeron largos periodos de tiempo entre el presente y mediados y finales de siglo desde WRF-CESM, por lo que no podemos descartar que se produzcan eventos de precipitación más intensos en el futuro.

Algunas recomendaciones que pueden extraerse de este estudio son las siguientes. En primer lugar, es necesario implementar metodologías robustas de registro de eventos de inundación con protocolos claros, tanto para los organismos responsables como para la sociedad civil, ya que esta información es valiosa a la hora de calibrar modelos hidrológicos. En segundo lugar, es necesario calibrar rigurosamente los parámetros que sirven de entrada a los modelos hidrológicos. En tercer lugar, es necesario seguir investigando para converger en metodologías concretas que impliquen modelos hidrológicos bidimensionales (por ejemplo, LISFLOOD-FP) y proyecciones climáticas (por ejemplo, *Dynamical Downscaling* o *Stochastic Weather Generators* (Fernández et al., 2021; Joshi et al., 2021)). Finalmente, es imperativo que las autoridades locales y agencias gubernamentales consideren este tipo de estudios como insumos para una mejor y más informada toma de decisiones en la planificación territorial, particularmente en ciudades con historial de inundaciones.

6. REFERENCIAS

- Abbate, A., Papini, M., & Longoni, L. (2021). Analysis of meteorological parameters triggering rainfall-induced landslide: a review of 70 years in Valtellina. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21(7), 2041-2058. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2041-2021>
- Abrams, M., & Crippen, R. (2019). *ASTER GDEM V3 (ASTER Global DEM) User Guide Version 1*. https://pdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGTM_User_Guide_V3.pdf?ga=2.88512671.563435595.1676434000-1907349901.1675376664
- Alfieri, L., Berenguer, M., Knechtl, V., Liechti, K., Sempere-Torres, D., & Zappa, M. (2019). Flash flood forecasting based on rainfall thresholds. In *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting* (pp. 1223-1260). Springer-Verlag.
- Amro, I., Mateos, J., Vega, M., Molina, R., & Katsaggelos, A. K. (2011). A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011(1), 79. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2011-79>
- Angel, M. C., & CEDEX. (1994). *Aplicación de la teledetección en la localización de superficies de agua. M-42* (CEDEX-CEHOPU, Ed. 1st ed.).
- Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for Small-Scale Flood Hazard Mapping. *Water*, 12(6), 1717. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1717>
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79-98. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>
- Asare, Y. M., Forkuo, E. K., Forkuor, G., & Thiel, M. (2020). Evaluation of gap-filling methods for Landsat 7 ETM+ SLC-off image for LULC classification in a heterogeneous landscape of West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 41(7), 2544-2564. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1693076>
- Bates, P. D. (2022). Flood Inundation Prediction. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 54(1), 287-315. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-030121-113138>
- Bates, P. D., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236(1), 54-77. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X)
- Börgel, R. (1983). *Mapa geomorfológico*. Santiago.
- Chen, J., Zhu, X., Vogelmann, J. E., Gao, F., & Jin, S. (2011). A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1053-1064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.010>

- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1), 131-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>
- Coon, W. F. (1998). *Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks* (Vol. 2441). US Geological Survey.
- Cornwall, W. (2021). Europe's deadly floods leave scientists stunned. *Science*, 373(6553), 372-373. <https://doi.org/doi:10.1126/science.373.6553.372>
- Cowan, W. L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7), 473-475.
- CRED. (2020). Natural disasters 2019: Now is the time to not give up. . https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf
- Cunnane, C. (1989). Statistical distributions for flood frequency analysis. *Operational hydrology report (WMO)*.
- De la Barrera, F., & Henríquez, C. (2017). Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, 81, 265-273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.067>
- DGA/MOP. (2023, 2023/02/14/). *Official Hydrometeorological and Water Quality Information Online, Dirección General de Aguas DGA, Ministerio de Obras Públicas MOP, Chile*. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., Larigauderie, A., Adhikari, J. R., Arico, S., Báldi, A., Bartuska, A., Baste, I. A., Bilgin, A., Brondizio, E., Chan, K. M. A., Figueroa, V. E., Duraiappah, A., Fischer, M., Hill, R., . . . Zlatanova, D. (2015). The IPBES Conceptual Framework — connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., Hill, R., Chan, K. M. A., Baste, I. A., Brauman, K. A., Polasky, S., Church, A., Lonsdale, M., Larigauderie, A., Leadley, P. W., van Oudenhoven, A. P. E., van der Plaats, F., Schröter, M., Lavorel, S., . . . Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>
- DMC. (2023, 2023/02/14/). *Dirección Meteorológica de Chile DMC - Climate Services*. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/aguaCaidaHistoricaMensual/360019>
- Doswell, C. A., III, Brooks, H. E., & Maddox, R. A. (1996). Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. *Weather and Forecasting*, 11(4), 560-581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011<0560:Fffaib>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011<0560:Fffaib>2.0.Co;2)
- Espinosa, P., Horacio, J., Ollero, A., De Meulder, B., Jaque, E., & Muñoz, M. D. (2018). Chapter 9 - When Urban Design Meets Fluvial Geomorphology: A

- Case Study in Chile. In M. J. Thornbush & C. D. Allen (Eds.), *Urban Geomorphology* (pp. 149-174). Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811951-8.00009-6>
- Fernández, A., Najafi, M. R., Durand, M., Mark, B. G., Moritz, M., Jung, H. C., Neal, J., Shastry, A., Laborde, S., Phang, S. C., Hamilton, I. M., & Xiao, N. (2016). Testing the skill of numerical hydraulic modeling to simulate spatiotemporal flooding patterns in the Logone floodplain, Cameroon. *Journal of Hydrology*, *539*, 265-280.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.026>
- Fernández, A., Schumacher, V., Ciocca, I., Rifo, A., Muñoz, A. A., & Justino, F. (2021). Validation of a 9-km WRF dynamical downscaling of temperature and precipitation for the period 1980–2005 over Central South Chile. *Theoretical and Applied Climatology*, *143*(1), 361-378.
<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03416-9>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, *140*, 23-35.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
- Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, *175*, 167-182.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
- Flood, N., Danaher, T., Gill, T., & Gillingham, S. (2013). An Operational Scheme for Deriving Standardised Surface Reflectance from Landsat TM/ETM+ and SPOT HRG Imagery for Eastern Australia. *Remote Sensing*, *5*(1), 83-109. <https://www.mdpi.com/2072-4292/5/1/83>
- Fujisada, H., Urai, M., & Iwasaki, A. (2012). Technical Methodology for ASTER Global DEM. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *50*(10), 3725-3736. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2187300>
- Gao, B.-c. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257-266.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *21*(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., . . . Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, *367*(1), 70-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>

- Gesch, D. B., Oimoen, M. J., Danielson, J. J., & Meyer, D. (2016). - Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model version 3 over the conterminous United States.
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N. G., Liang, D., Falconer, R. A., Lin, B., Waller, S., Crossley, A. J., & Mason, D. C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 161(1), 13-30. <https://doi.org/10.1680/wama.2008.161.1.13>
- IPBES. (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6417333>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ([, Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M.], Ed.). Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ([, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou], Ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jones, R. L., Guha-Sapir, D., & Tubeuf, S. (2022). Human and economic impacts of natural disasters: can we trust the global data? *Scientific Data*, 9(1), 572. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01667-x>
- Joshi, S., Brown, D., & Busteed, P. (2021). Intensification scenarios in projected precipitation using stochastic weather generators: a case study of central Oklahoma. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(3), 1285-1296. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03599-9>
- Kaiser, M., Borga, M., & Disse, M. (2020). Occurrence and Characteristics of Flash Floods in Bavaria (Germany). In W. Leal Filho, G. J. Nagy, M. Borga, P. D. Chávez Muñoz, & A. Magnuszewski (Eds.), *Climate Change, Hazards and Adaptation Options: Handling the Impacts of a Changing Climate* (pp. 293-310). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37425-9_16
- Langhammer, J. (2019). UAV Monitoring of Stream Restorations. *Hydrology*, 6(2), 29. <https://www.mdpi.com/2306-5338/6/2/29>
- Link, O., Brox-Escudero, L. M., González, J., Aguayo, M., Torrejón, F., Montalva, G., & Eguibar-Galán, M. Á. (2019). A paleo-hydro-geomorphological perspective on urban flood risk assessment. *Hydrological Processes*, 33(25), 3169-3183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.13590>

- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J.-M. (2020). Effect of Land Use/Cover Change on the Hydrological Response of a Southern Center Basin of Chile. *Water*, 12(1), 302. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/1/302>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- MINVU. (2003). *Observatorio Urbano MINVU - Archivo Nacional IPT Plan Regulador Metropolitano Concepción*. Retrieved 2023/02/24/ from http://observatoriourbano.minvu.cl/lpt/wp_resultado_decreto.asp?r=8&c=169&i=27#
- MINVU. (2013). *Imágenes Digitales y Cartografía Base para el área Metropolitana de Concepción, Región del Biobío (Informe final)*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo. Concepción, Chile
- MINVU. (2017a). *ORDENANZA MODIFICACIÓN PLAN REGULADOR METROPOLITANO DE CONCEPCIÓN - Ministeria de Vivienda y Urbanismo (MINVU)*. Concepción, Región del Biobío Retrieved from <https://prmconcepcion.minvu.gob.cl/wp-content/prmc/doc/03-ordenanza-2018.pdf>
- MINVU. (2017b). *PLANO PRMC-01 ZONIFICACION 02-03 Modificación Plan Regulador Metropolitano de Concepción*. <https://prmconcepcion.minvu.gob.cl/wp-content/content/planreguladormetropolitano/planos/zonificacion-lamina-02-03.pdf>
- Mirza, M. M. Q. (2002). Global warming and changes in the probability of occurrence of floods in Bangladesh and implications. *Global Environmental Change*, 12(2), 127-138. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00002-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00002-X)
- Mishra, B. K., Rafiei Emam, A., Masago, Y., Kumar, P., Regmi, R. K., & Fukushi, K. (2018). Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management*, 11(S2), S1105-S1115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>
- MOP/DOH. (2008). *Diseño de Obras Fluviales Río Andalién, esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Bio Bío (Informe Final)*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. Concepción, Chile
- MOP/DOH. (2015). *Diagnóstico río Andalién 2015, Provincia de Concepción, Región del Bio Bío (Informe Final)*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Obras Hidráulicas. Concepción, Chile
- Munizaga, J., García, M., Ureta, F., Novoa, V., Rojas, O., & Rojas, C. (2022). Mapping Coastal Wetlands Using Satellite Imagery and Machine Learning in a Highly Urbanized Landscape. *Sustainability*, 14(9).

- Naidoo, K., Manyangadze, T., & Lokotola, C. L. (2022). Primary care disaster management for extreme weather events, South Africa [climate change; flooding; primary care facility; disaster management, extreme weather.]. 2022, 14(1). <https://doi.org/10.4102/phcfm.v14i1.3778>
- Neal, J., Schumann, G., & Bates, P. (2012). A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. *Water Resources Research*, 48(11). <https://doi.org/10.1029/2012wr012514>
- NWS-USA. (2022). *Flash Flood*. Retrieved 09-11 from <https://www.weather.gov/ffc/floods>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- ONEMI. (2006). *Informe Sistema Frontal 10 al 13 de julio 2006. Ministerio de Interior. Oficina Nacional de Emergencias. Departamento de Protección Civil*. Santiago, Chile
- Papagiannaki, K., Petrucci, O., Diakakis, M., Kotroni, V., Aceto, L., Bianchi, C., Brázdil, R., Gelabert, M. G., Inbar, M., Kahraman, A., Kiliç, Ö., Krahn, A., Kreibich, H., Llasat, M. C., Llasat-Botija, M., Macdonald, N., de Brito, M. M., Mercuri, M., Pereira, S., . . . Zêzere, J. L. (2022). Developing a large-scale dataset of flood fatalities for territories in the Euro-Mediterranean region, FFEM-DB. *Scientific Data*, 9(1), 166. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01273-x>
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., Watson, R. T., Başak Dessane, E., Islar, M., Kelemen, E., Maris, V., Quaas, M., Subramanian, S. M., Wittmer, H., Adlan, A., Ahn, S., Al-Hafedh, Y. S., Amankwah, E., Asah, S. T., . . . Yagi, N. (2017). Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26-27, 7-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
- Pauchard, A., Aguayo, M., Peña, E., & Urrutia, R. (2006). Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: The case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile). *Biological Conservation*, 127(3), 272-281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.05.015>
- Pfahl, S., O'Gorman, P. A., & Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423-427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>
- Rentschler, J., Salhab, M., & Jafino, B. A. (2022). Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications*, 13(1), 3527. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30727-4>

- Rojas, C., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., & Pino, J. (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy*, 80, 47-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.036>
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C., & Vivanco, M. (2013). Assessing land-use and -cover changes in relation to geographic factors and urban planning in the metropolitan area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography*, 39, 93-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.007>
- Rojas, C., Pino, J., & Jaque, E. (2013). Strategic Environmental Assessment in Latin America: A methodological proposal for urban planning in the Metropolitan Area of Concepción (Chile). *Land Use Policy*, 30(1), 519-527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.04.018>
- Rojas, O. (2015). *Cambios ambientales y dinámica de Inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile* Universidad de Concepción]. Concepción, Chile.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de geografía Norte Grande*, 177-192. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022014000100012&nrm=iso
- Sadeghi, F., Rubinato, M., Goerke, M., & Hart, J. (2022). Assessing the Performance of LISFLOOD-FP and SWMM for a Small Watershed with Scarce Data Availability. *Water*, 14(5), 748. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/5/748>
- Schnebele, E., Cervone, G., & Waters, N. (2014). Road assessment after flood events using non-authoritative data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14(4), 1007-1015. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1007-2014>
- Schumann, G. J.-P., Muhlhausen, J., & Andreadis, K. M. (2019). Rapid Mapping of Small-Scale River-Floodplain Environments Using UAV SfM Supports Classical Theory. *Remote Sensing*, 11(8), 982. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/8/982>
- See, L. (2019). A Review of Citizen Science and Crowdsourcing in Applications of Pluvial Flooding [Mini Review]. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00044>
- Sene, K. (2013). *Flash Floods, Forecasting and Warning* (1 ed.). Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-5164-4>
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J. C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences Journal*, 64(14), 1769-1782. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1671982>
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>

- Tang, W., Zhao, C., Lin, J., Jiao, C., Zheng, G., Zhu, J., Pan, X., & Han, X. (2022). Improved Spectral Water Index Combined with Otsu Algorithm to Extract Muddy Coastline Data. *Water*, 14(6), 855. <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/855>
- Thiébaud, S., & Moatti, J.-P. (2016). *The Mediterranean region under climate change: A scientific update*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.24549>
- UNESCO. (1999). *Flash Flood in arid and semi-arid zones* International Hydrological Programme, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000118882>
- USGS. (2004, 2023/02/15/). *Landsat 7 SLC-off Gap-Filled Products Phase Two Methodology* | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-7-slc-gap-filled-products-phase-two-methodology>
- USGS. (2021, 2023/02/16/). *Landsat 4-7 Collection 2 Level 2 Science Product Guide* | U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-4-7-collection-2-level-2-science-product-guide>
- Vidal, C., & Martel, S. (2007). Ciudad y riesgos naturales: Efectos del evento pluviométrico de Julio del 2006 en el Gran Concepción. *Arquitecturas del Sur*, 25. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/AS/article/view/844>
- Vidal, C., & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. *Concepción metropolitana (AMC). Planes, procesos y proyectos / Pérez, L. e Hidalgo, R. (Editores), Serie GEOlibros, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118084>
- Westra, S., Fowler, H. J., Evans, J. P., Alexander, L. V., Berg, P., Johnson, F., Kendon, E. J., Lenderink, G., & Roberts, N. M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522-555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- Wing, O. E. J., Bates, P. D., Neal, J. C., Sampson, C. C., Smith, A. M., Quinn, N., Shustikova, I., Domeneghetti, A., Gilles, D. W., Goska, R., & Krajewski, W. F. (2019). A New Automated Method for Improved Flood Defense Representation in Large-Scale Hydraulic Models. *Water Resources Research*, 55(12), 11007-11034. <https://doi.org/10.1029/2019wr025957>
- Wing, O. E. J., Bates, P. D., Sampson, C. C., Smith, A. M., Johnson, K. A., & Erickson, T. A. (2017). Validation of a 30 m resolution flood hazard model of the conterminous United States. *Water Resources Research*, 53(9), 7968-7986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017WR020917>
- WMO/UNESCO. (2012). International Glossary of Hydrology. In.

- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhu, X., Liu, D., & Chen, J. (2012). A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*, 124, 49-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.019>

