



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Ambientales -Programa de Doctorado en Ciencias
Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales

Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Chile.

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales con
mención en Sistemas Acuáticos Continentales

OCTAVIO ENRIQUE ROJAS VILCHES
CONCEPCIÓN-CHILE
2015

Profesor Guía: Dra. María Mardones Flores
Dpto. de Planificación Territorial y Sistemas Urbanos,
Facultad de Ciencias Ambientales y centro EULA-Chile
Universidad de Concepción

Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado

La Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales con Mención en Sistemas Acuáticos continentales titulada “Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Chile”, del Sr. Octavio Enrique Rojas Vilches y realizada bajo la Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente comisión de evaluación:

Dra. María Mardones Flores
Profesora Guía
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

Dr. José Luis Arumí Ribera
Miembro Comité de Tesis
Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción

Dr. Mauricio Aguayo Arias
Miembro Comité de Tesis
Facultad de Ciencias Ambientales
Universidad de Concepción

Dra. Carolina Martínez Reyes
Evaluador Externo
Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política
Pontificia Universidad Católica de Chile



Concepción – Chile
2015



A mis Padres y familia.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a la profesora Dra. María Mardones, profesora guía de esta tesis, por toda su dedicación, ayuda, sabios y cariñosos consejos. Le agradezco por haber confiado y creído en mí desde junio del año 2010 cuando me abrió las puertas de su oficina y me aceptó como tesista. Ha sido un camino largo, y sin duda sin sus palabras de aliento, su visión, organización de la investigación y enormes contribuciones, se transformó en una senda más amigable, de la que aprendí valiosas enseñanzas tanto personales como académicas, que sin duda perdurarán.

Agradezco también a los profesores miembros de la comisión Dr. José Luis Arumí del Departamento de Recursos Hídricos y al Dr. Mauricio Aguayo del Departamento de Planificación Territorial, quienes brindaron su colaboración, tiempo y consejos en el desarrollo del presente trabajo.

A la profesora Dra. Carolina Martínez del Laboratorio de Geografía Física del Departamento de Geografía, e Hidrógrafo Luis Flores Flores de Ingeniería E.O.H, por ofrecerme su colaboración en los terrenos, equipos para muestreo y procesos de datos de marea y topográficos. Caminamos mucho juntos, durante esos largos días por el río Andalién, sin duda su ayuda y amistad fue inestimable en el proceso que culmina.

Mi gratitud para el Dr. Alberto Araneda por facilitar los equipos del laboratorio de sedimentología del centro EULA para realizar los análisis de muestras. A la Dra. Katia Sáez del Departamento de Estadística, por sus valiosos consejos, tiempo y ayuda en los análisis realizados. Y a mi amiga y colega la Dra. Carolina Rojas del Departamento de Geografía, por su apoyo en mi tesis como directora del proyecto VRID.

También agradecer a las geógrafas Paulina Flores y Gloria Fuentes por su trabajo en la digitalización de información. A Fabián Pacheco y Hernán Rodríguez por su ayuda en la revisión de inundaciones históricas.

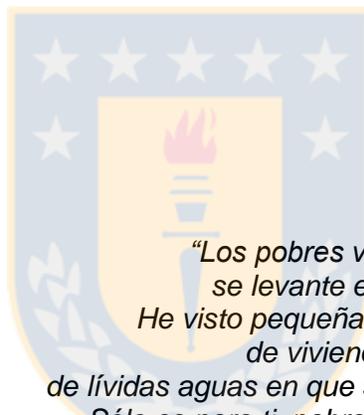
A mi familia, a mis padres, hermanos, abuelos, por haber disculpado tantas ausencias durante este tiempo. Siempre sentí su apoyo a la distancia. A mis compañeros y amigos del doctorado Vanessa y Ramón, por nuestros días de charla y ánimo mutuo durante esta etapa, sin duda fueron fundamentales durante este periodo.

A las personas e instituciones que amablemente facilitaron datos para la realización de esta tesis: Isabel Drews y Betsabé Gallardo del Departamento de Obras Fluviales de la Dirección de Obras Hidráulicas (Santiago); Sr. Andrés Murillo Bravo Jefe Aeródromo Carriel Sur; Al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA); y al Centro de Investigación Marítimo Portuario (CIMP) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

A las entidades y proyectos financiadores del proyecto: Programa BECAS DOC-NACIONAL de la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología CONICYT del Gobierno de Chile y a su programa complementario de Gastos Operacionales N° 21110383. Al Proyecto VRID enlace “Efectos de la Urbanización en la conservación de la Biodiversidad de Humedales Costeros” N° 214.603.015-10 financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción.

A todas las personas que, aunque no figuran con sus nombres aquí, estuvieron presentes de alguna forma en estos 4 años e hicieron posible que este trabajo concluya.

A todos mi eterno agradecimiento.



*“Los pobres viven abajo esperando que el río
se levante en la noche y se los lleve al mar.
He visto pequeñas cunas que flotaban, destrozos
de viviendas, sillas, y una cólera augusta
de lívidas aguas en que se confunden el cielo y el terror.
Sólo es para ti, pobre, para tu esposa y tu sembrado,
para tu perro y tus herramientas, para que aprendas
a mendigo.
(...)”*

*Come este fango arrollador y estas ruinas que nadan
con tus muertos vagando dulcemente hacia el mar,
entre las pobres mesas y los perdidos árboles
que van de tumbo en tumbo mostrando sus raíces.”*

(Canto General, Quiero Volver al Sur, Pablo Neruda, 1941)

Índice de Contenidos

Agradecimientos	IV
Índice de Contenidos.....	VI
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Ilustraciones.....	X
Reseña Currículum Vitae	XII
Resumen.....	XIV
Abstract.....	XV
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Las inundaciones Fluviales y Cambio Ambiental Global	1
1.2 Las Inundaciones Fluviales en Chile.....	3
1.3 Inundaciones en cuencas hidrográficas costeras de régimen pluvial, localizadas en dominios climáticos mediterráneos.	6
2.-HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	9
2.1 Hipótesis.....	9
2.2 Objetivo general.....	9
2.3 Objetivos específicos	10
3.-MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1 Área de Estudio	10
3.2 Inundaciones y cambios ambientales: Cuenca del Andalién	11
3.3 Métodos.....	13
4.-RESULTADOS.....	14
4.1.- Capítulo 1. Inundaciones fluviales en Chile continental (1574-2012).	14

Resumen.....	14
4.2.- Capítulo 2. Inundaciones fluviales en la Cuenca del Andalién (1960-2010): tendencias de precipitación extrema y su relación con El Niño Oscilación del Sur...	32
Resumen.....	32
Abstract.....	33
Introduction	34
Materials and methods.....	35
Study area	35
Data sources and trends index	37
Statistical analysis	39
Results	41
Flooding 1960-2010.....	41
Floods and ENSO.....	43
Rainfall extreme, indices and trend estimation.....	45
Discussion.....	48
Conclusions	50
References.....	50
4.3.- Capítulo 3. Inundaciones fluviales en la cuenca del Andalién y su relación con mareas y aumento del nivel del mar debido al Cambio Climático.	55
Resumen.....	55
Introducción	55
Área de estudio	57
Metodología	59
Caracterización física de la sección inferior de la cuenca	59
Modelación hidráulica y nivel del mar	60

Resultados	61
Caracterización física de la sección inferior	61
Ingreso de la marea en el sistema	64
Mareas e inundaciones.....	66
Discusión	71
Conclusiones.....	74
Referencias.....	75
4.4.- Capítulo 4. Expansión urbana y desastres por inundaciones fluviales en la cuenca del Andalién.	80
Resumen.....	80
Introducción	81
Área de estudio	82
Metodología	84
Análisis de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana	84
Análisis de los desastres fluviales.....	85
Resultados	88
Análisis de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana	88
Análisis de los desastres fluviales.....	93
Discusión	99
Conclusiones.....	100
Referencias.....	101
5.- DISCUSIÓN GENERAL	108
6.- CONCLUSIONES	116
7.- REFERENCIAS GENERALES	119

Índice de Tablas

Table 2.1 Relative magnitude of river floods.....	38
Table 2.2 Stations rainfall record used for statistical analysis of trends and definition of indices.....	39
Table 2.3 Indices associated to generation of floods	40
Table 2.4 Historical floods registered in the lower section of the Andalién River basin, 1960- 2010.....	41
Table 2.5 Chi-Square test (χ^2), between flood/normal years in the Andalién river basin and Niño 3.4 ONI index (Austral winter AMJ to ASO) 1960-2010	43
Table 2.6 Statistical analysis of the pluviometric indices.....	46
Table 2.7 Comparison of mean rainfall indices selected for the periods 1960-1974, 1975-1997 and 1998-2010	48
Tabla 3.1 Sea-Level scenarios (SLS), H (m)	61
Tabla 3.2 Zonas estuarinas valle del río Andalién. Condiciones de primavera, año 2013.	62
Tabla 3.3 Test ANOVA/ Tuckey ($\alpha = 0,05$) para los 3 cluster de la sección inferior de la cuenca.	64
Tabla 3.4 Valores característicos de la marea (m) (campana primavera 2014)	65
Tabla 4.1 Representatividad del Píxel (RDP) y error medio cuadrático (RMS)	84
Tabla 4.2 Elementos vulnerables	87
Tabla 4.3 Matriz de riesgo por inundación fluvial.....	88
Tabla 4.4 Variación de la superficie (ha) de las unidades geomorfológicas principalmente por efecto de la urbanización, periodo 1943-2011	90
Tabla 4.5 Evolución de la superficie (ha) de los principales cursos hídricos en el curso inferior de la cuenca 1943-2011	92
Tabla 4.6 Test de Mann-Kendall evolución de la red hídrica	93
Tabla 4.7 Población y viviendas afectadas según cada tasa de retorno	99

Índice de Ilustraciones

Fig. 1 Área de estudio general. Línea roja indica límite de la cuenca.	11
Fig. 2.1 Location of the study area, with the position of meteorological stations. (1) Carriel Sur, (2) Nonguén, and (3) Caracol.	36
Fig. 2.2 Boxplots of maximum daily average discharge in the lower section of Andalién River, 1961-2011 ($m^3 s^{-1}$). Horizontal line and square inside the box indicate median and mean. Lower and upper ends of the box correspond to the quantile 0.25 and 0.75. Lower whisker and upper quantile are 0.05 and 0.95, respectively. Circles correspond to atypical values. Data source: Chilean General Water Directorate, (<i>Dirección General de Aguas- DGA</i>).	37
Fig. 2.3 Trends of river floods in the lower section of the basin and the ENSO variability during austral winter. Dotted horizontal lines indicate the means of the three cycles, corresponding to the 1974 and 1997 shift point, determined by Pettitt's test. Horizontal lines indicate levels of relative magnitude. Green triangles correspond to small floods, yellow triangles, to moderate floods; and red triangles correspond to large magnitude floods. Black crosses represent the water height (m) registered at the flow gauging station located at the lower section of Andalién River.	42
Fig. 2.4 Rainfall behavior 1968–2010: a) monthly rainfall in Carriel Sur station; b) ONI index El Niño region 3.4 c) rainfall standardized in Carriel Sur station (e.g. DJF, 2 JFM, etc.)	44
Fig. 2.5 Maximum rainfall in 24-h for different return periods (T) in Concepción. Probability distributions are indicated for each month: (G) Gamma; (LN-III) LogNormal III parameters; (LN) LogNormal; (LP) LogPearson; (GU) Gumbel. Months are indicated shortcuts.	45
Fig. 2.6 Trends of statistically significant indices R_{95p} and R_{x1day}	47
Fig. 3.1 Área de estudio: (a) Contexto sudamericano; (b) contexto regional; (c) cuenca del Andalién con niveles de altitud; (d) curso inferior de la cuenca, se indica posición de estaciones de muestreo de parámetros físico-químicos y sensores de marea.	58
Fig. 3.2 Zonas del estuario según análisis de conglomerados (distancia euclídea)	63
Fig. 3.3 Comportamiento de la salinidad en profundidad 2014 (a) invierno y (b) primavera. Altura limnigráfica estación DGA Andalién Camino a Penco v/s mareas; (c) Puente Las Ballenas 27/07 – 25/08 (d) estación intermedia aeropuerto 06/09 – 26/09 (e) estación superior 31/10 – 19/11.	65

Fig. 3.4 Niveles de marea observados y pronosticados para el puerto de Talcahuano según magnitud relativa de las inundaciones. La línea horizontal y el cuadrado dentro de la caja indican la mediana y la media. El extremo inferior y superior de la caja corresponde al cuantil 0,25 y 0,75. Bigotes inferior y superior cuantil 0,05 y 0,95 respectivamente.....	67
Fig. 3.5 Comparación entre marea observada y predicción mareógrafo de Talcahuano para el periodo 12-14 de Julio de 2006.	68
Fig. 3.6 Modelación de inundaciones para una tasa de retorno de 100 años con diferentes escenarios de marea.	69
Fig. 3.7 Superficies de unidades inundadas según SLS (escala logarítmica base 2)...	70
Fig. 3.8 Comparación SLS ₃ e inundación año 2006. Fotografía de Didier RoussetBuy.	71
Fig. 4.1 Área de estudio. Línea roja indica límite de la cuenca.	83
Fig. 4.2 Entrevista Sra. Adelina Varela (Sector General Bonilla).	86
Fig. 4.3 Geomorfología del sitio de emplazamiento de la ciudad de Concepción y de la sección inferior de la cuenca del río Andalién. Superficie urbana, año 1943.	89
Fig. 4.4 Etapas de expansión de la ciudad de Concepción, sobre las unidades geomorfológicas de la sección inferior de la Cuenca del Andalién, periodo 1943-2011.	91
Fig. 4.5 Evolución de la superficie urbana y pérdida de la naturalidad de unidades geomorfológicas susceptibles a inundación fluvial 1943-2011.....	92
Fig. 4.6 Peligro de inundación para diferentes tasas de retorno en la sección inferior de la cuenca del río Andalién	94
Fig. 4.7 Superficie inundada (ha) según niveles de peligrosidad y tasas de retorno ...	95
Fig. 4.8 Área de inundación (%) por clase de uso de suelo según períodos de retorno	96
Fig. 4.9 Vulnerabilidad total en la sección inferior de la cuenca.....	97
Fig. 4.10 Superficie de riesgo (ha) según niveles y tasas de retorno.....	97
Fig. 4.11 Riesgo de inundación para diferentes tasas de retorno. En T=500 se indica límite máximo alcanzado por la gran inundación del año 2006.....	98

Reseña Currículum Vitae

Octavio Enrique Rojas Vilches

2005-2010: Licenciatura en Educación, Título Profesional de Profesor de Historia y Geografía, Universidad de Concepción, Chile

2011-2014: Doctorado en Ciencias Ambientales con mención en Sistemas Acuáticos Continentales

PUBLICACIONES

ISI- Relacionadas directamente con el proyecto de tesis

Rojas, O. Mardones, M. Rojas, C. Martínez, C. y Flores, L. (Por enviar). Expansión urbana y desastres por inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro de Chile (1943-2011). *Habitat International*.

Rojas, O. Mardones, M. Martínez, C. Sáez, K. Flores, L. y Araneda, A. (por enviar). Inundaciones fluviales en Chile central: implicancias de las mareas y del aumento del nivel del mar debido al Cambio Climático para el siglo XXI. *Applied Geography*.

Rojas, O. & Mardones, M. (enviado). Floods in a coastal Mediterranean basin south Central Chile (1960-2010): Trends, implications and rainfall variability associated with ENSO. *Physical Geography*.

Rojas, O. Mardones, M. Aguayo, M. y Arumí, J.L. (2014). Una revisión de las inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, tipologías y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol. 57. 177-192

Otras publicaciones ISI del período

Rojas, C. Sepúlveda, E. Barbosa, O. Martínez, C. **Rojas, O.** (en revisión). Patrones de urbanización y biodiversidad en humedales urbanos. *Revista de Geografía Norte Grande*.

Rojas, O. Sáez, K. Martínez, C. Jaque, E. (2014). Efectos socioambientales post-catástrofe en localidades costeras vulnerables afectadas por el tsunami del 27/02/2010 en Chile. *Interciencia*. Vol. 39. 383-390

Martínez, C. **Rojas, O.** Aránguiz, R. Belmonte, A. Altamirano, A. y Flores, P. (2012). Riesgo de tsunami en caleta Tubul, región del Biobío: escenarios extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol. 53. 85-106

NO-ISI

Rojas, O. y Martínez, C. (2011). Riesgos Naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*. Vol. 20. 83-116. (Scielo)

Martínez, C. **Rojas, O.** Jaque, E. Quezada, J. Vázquez, D. y Belmonte, A. (2011). Efectos territoriales del tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa de la región del Biobío, Chile. *Revista Geográfica de América Central*. 1-16 (Latinindex)

Rojas, O. Martínez, C. y Jaque, E. (2010). Recurrencia histórica por inundación fluvial en el curso inferior del Río Carampangue, Región del Biobío. *Revista Tiempo y Espacio*. Vol. 25, 117-135 (Latinindex)

LIBROS Y CAPÍTULOS DE LIBROS

Martínez, C. **Rojas, O.** Jaque, E. y Fernández, A. (2013). Los sistemas naturales integrados en Geografía. Texto de Apoyo a la Docencia. Segunda Edición. Impresión Talleres Dirección de Docencia, Universidad de Concepción, 209 pp. I.S.B.N. 978-956-8029-78-4.

Martínez, C. **Rojas, O.** Jaque, E. y Alcántara-Carrió, J. (editores). (2010). Libro de resúmenes VI Seminario Red Iberoamericana en Teledetección aplicada a la prevención de riesgos geológicos litorales. Ed. Universidad de Concepción. 25 pp. ISBN 978-956-227-368-8

ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Principal: Riesgos Naturales

Secundaria: Geografía Física y Ambiental, Geomorfología Fluvial, Hidroclimatología

BECAS Y RECONOCIMIENTOS

2010: Premio Universidad de Concepción

2011: Beca Doctorado Nacional CONICYT

EXPERIENCIA DOCENTE

Desde el año 2010 ha impartido docencia de pregrado para las carreras de Geografía, Pedagogía en Historia y Geografía, Biología, Biología Marina e Ingeniería Ambiental en la Universidad de Concepción; en las asignaturas de Geografía Física, Climatología, Sistemas Atmosféricos, Cambio Global, Conflictos Ambientales, Sistemas Hidrológicos y Sistemas Territoriales. Desde el año 2013 desarrolla docencia en el programa de Magíster en Análisis Geográfico para las asignaturas de Riesgos Naturales y Gestión de Cuencas Hidrográficas.

Resumen

El objetivo fundamental de esta investigación es Analizar, explicar y evaluar las relaciones entre cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en la sección inferior de la cuenca costera del río Andalién (36°S), Región del Biobío, Chile. Se indaga: tendencias históricas de las inundaciones, rol de la dinámica climática (variabilidad de El Niño Oscilación del Sur –ENOS-, tendencias), mareas, urbanización y cambios geomorfológicos. Las tendencias climáticas y mareas además fueron vinculadas con el Cambio Climático Global (CCG).

La evaluación de las tendencias históricas y efectos ambientales de las inundaciones se realizó a escala del territorio chileno continental (1574-2012) y de cuenca (1960-2010), mediante revisión de periódicos y fuentes secundarias. Para evaluar el rol de la dinámica climática (1960-2010) se utilizó ajuste de valores extremos, correlaciones y pruebas de tendencias (Mann-Kendall y estimador de Sen). La influencia de las mareas en las inundaciones se estudió mediante modelación hidráulica (1D) y datos topobatemétricos (GPS, LIDAR). El análisis de las relaciones de cambio entre los factores urbanización-geomorfología e inundaciones (1943-2011) fueron estudiados a través de fotointerpretación, datos censales y modelación hidráulica (HECgeo-RAS 4.3.1, Hec-Ras 4.1). Las cartografías temáticas se generaron en el SIG ArcGIS 9.3.

El dominio mediterráneo chileno presentó la mayor recurrencia de inundaciones a nivel nacional, asociado con precipitación intensa y persistente; consistente con cambios ambientales ocurridos durante las últimas tres décadas, como los acaecidos en la cuenca costera del río Andalién. En esta última se registraron 21 eventos de inundación (1960-2010), con una recurrencia promedio de 2.43 años, 100% durante el invierno austral. Se observaron tres periodos de inundaciones; 1960-1974 con una magnitud relativa moderada de inundaciones (7,3); 1975-1998 con eventos de pequeña magnitud relativa (5,2); y 1998-2010 con inundaciones de mediana y gran magnitud (9,2).

Las implicaciones del CCG a escala local, se observó en el incremento de la intensidad de las precipitaciones máximas diarias (Rx1day, Rx2day y Rx3day) que mostraron un aumento del $\approx 14\%$ en 50 años, que pueden ser asociadas con el aumento de un 26% en la magnitud relativa de las inundaciones. En relación a la ocurrencia de episodios ENSO-cálidos e inundaciones, no se comprobó una relación estadísticamente significativa.

Las inundaciones históricas y los niveles de mareas en el estuario micromareal del Andalién, revelaron que eventos de elevada magnitud ocurrieron cuando se combinaron mareas meteorológicas y astronómicas en sicigias; durante estas últimas ocurrió un 57% de los eventos. Potenciales aumentos de 60 cm en el NMM atribuidos al CCG, provocarían un aumento de las zonas inundables en un 4% en relación al peor escenario actual; mientras que las tendencias de alzamiento tectónico costero, podrían implicar un efecto de amortiguación en los pronósticos de aumento de NMM.

Las transformaciones físicas del cauce desde el año 2008 disminuyeron el riesgo para tasas de retorno de 2, 5 y 10 años; sin embargo, para tasas de retorno elevadas (e.g. 500 años) el riesgo se mantuvo alto. El incremento de la superficie urbana en la planicie de inundación en 1.458 ha en los últimos 68 años en unidades geomorfológicas susceptibles a inundaciones (<8 msnm y pendientes <0,5), aumentó la exposición y vulnerabilidad. La superficie destinada a usos residenciales, comerciales e industriales incrementó su superficie inundada de 15 ha en T=2 a 374 ha en T=500 y la cantidad de personas afectadas aumentó en 37.380.

La evaluación final de los factores de cambio ambiental, mostró que la tendencia climática y mareas contribuyeron en la generación de inundaciones desde la desembocadura hasta el 7,3 Km del cauce. En el tramo más urbanizado 7,3-14,8 Km y estero Nonguén, las tendencias de aumento en la precipitación extrema y el aumento de la urbanización, explicaron de mejor forma las inundaciones. La carta de riesgos de inundación propuesta para diferentes tasas de retorno, podría favorecer una ocupación del territorio más sustentable y menos vulnerable a este tipo de desastres.

Palabras claves: inundaciones fluviales, Cambio Climático, ENSO, modelación hidráulica, Ordenamiento Territorial, Mareas, Riesgo Natural, río Andalién.



Abstract

Fundamentally, this study analysed, explains and evaluates of the relationship between the environmental change and dynamics river flooding on the lower section of the Andalién River Basin (36°S), in the Chilean region of Biobío. We investigated: historical tendencies of the flooding, the dynamic role of the climate (variations in El Niño Southern Oscillation –ENSO-, trends), tides, urbanization and geomorphological changes. The climatic trends and tides were also linked to Global Climate Change (GCC).

Evaluation of the historical tendencies and environmental effects of flooding was carried out on a Chilean Continental scale (1574-2012) and basin (1960-2010), through the extensive revision of newspapers and other secondary sources. To evaluate the role of climate dynamics. (1960-2010), we used extreme value adjustment, correlations and trends assays (Mann-Kendal and Sen Estimator). The tidal influence on flooding was studied through hydraulic modelling (1D) and topobathymetric data (GPS, LIDAR). Analysis of the change relationships between the factors of urbanization-geomorphology and flooding (1943-2011) were examined through photointerpretation, census data and hydraulic modelling (HECgeo-RAS 4.3.1, Hec-Ras 4.1). Thematic cartography was generated in SIG ArcGIS 9.3.

The Chilean Mediterranean Domain presented the highest recurrence of floods on a national level, associated with intense and persistent precipitation. This data is consistent with changes that have occurred during the last three decades, as shown for the Andalién River Basin. In this region, 21 flooding events were registered (1960-

2010), with a recurrence average of 2.43 years, 100% of during the austral winter. Three flooding periods were observed; 1960-1974, with a moderate relative magnitude (7.3); 1975-1998, with small relative magnitude events (5.2); and 1998-2010 of medium and large magnitudes.

Implications of GCC on a local scale showed an increment on the intensity on maximum daily precipitation (Rx1day, Rx2day and Rx3day) showing an increase of $\approx 14\%$ in 50 years, associated to a 26% increase in the relative magnitude of the flooding. In relation to the occurrence of warm-ENSO episodes and flooding, not statistically significant relationship was found.

Historical floods and tidal levels in the Andalién microtidal estuary revealed that higher magnitude events occurred when combined meteorological and astronomical tides in syzygy: during these periods 57% of the events occurred. Potential increases of 60 cm in NMM attributed to GCC, could provoke an increase in the flood zones in up to 4%. Meanwhile, coastal uplift tendencies could implicate a cushioning effect on the increase of NMM.

The physical transformations of the river channel from 2008 decreased risk for return periods of 2, 5 and 10 years: however, for elevated return period (e.g. 500 years) the risk is remained high. The increment in urban surface area over the floodplain was 1,468 ha over the last 68 years, in geomorphological units susceptible to flooding (< 8 msnm and slopes $< 0,5$), increased exposure and vulnerability. The surface area destined to residential, commercial and industrial use increased its flood zone by 15 ha in $T=2$ to 374 ha in $T=500$, and the number of people affected increased to 37,380.

Final evaluation of environmental change factors, showed that climatic and tidal tendency contributed to the generation of floods from the mouth to 7.3 km of the basin. In the most urbanized section, 7.3-14.8 km and the Nonguén stream, the tendencies of increase in extreme precipitation and the increase in urbanization better explained the flooding. Our proposed risk map for different return period could favour territorial occupation that is more sustainable and less vulnerable to these types of disasters.

Keywords: River floods, Climate Change, ENSO, hydraulic modelling, Territorial planning, tides, natural risks, Andalién River.

1.- INTRODUCCIÓN

1.1 Las inundaciones Fluviales y Cambio Ambiental Global

Desde la revolución industrial una serie de cambios se han producido a escala planetaria (e.g. aumento de la población mundial, aumento de gases efecto invernadero (GEI), acumulación de residuos sólidos, contaminación, cambios de uso de suelo y Cambio Climático Global) acelerando procesos naturales y degradando el sistema terrestre. Este conjunto de modificaciones en el sistema Tierra-Atmósfera-Océano-Biosfera, ha sido denominado Cambio Ambiental Global (*Global Change*) (Duarte *et al.*, 2006). Una característica central de este cambio es la modificación del ciclo hidrológico (Gilroy & McCuen, 2012); las actividades humanas por medio de obras hidráulicas, deforestación, construcción de caminos, cambios de uso de suelo, han alterado el régimen de caudal de muchos ríos (Lytle & Poff, 2004; Nilsson *et al.*, 2005; Barredo & Engelen, 2010; Chu *et al.*, 2010; Olang & Furst, 2011; Banasik & Pham, 2010; Panahi *et al.*, 2010; Nirupama & Simonovic, 2007; Maaskant *et al.*, 2009). Dichas intervenciones sumadas al Calentamiento Climático Global (Arnell, 2004; IPCC, 2007), han provocado episodios más intensos de precipitación y caudales extraordinarios, proyectándose un aumento de las inundaciones en las próximas décadas (Eissa & Zaqui, 2011). Esta situación cambiante implica la necesidad de abordar la gestión de inundaciones a escala de cuenca hidrográfica como herramienta para la toma de decisiones territoriales (Hitz & Smith, 2004; Thielen *et al.*, 2009; Barredo & Engelen, 2010).

Las inundaciones fluviales corresponden a un proceso natural por el cual el flujo rebosa el cauce (Geis & Steeves, 1980; Junk *et al.*, 1989; Tockner *et al.*, 2000; Lytle & Poff, 2004; Thorp, 2009; Tockner *et al.*, 2010). El caudal de inundación, se entiende como el caudal que supera las orillas del cauce. Por otra parte, la variación de altura de la lámina de agua en un río se denomina fase del río. Fase de inundación se utiliza para indicar que la elevación de la lámina de agua ha alcanzado un nivel potencialmente dañino, que dependerá exclusivamente del uso humano de la llanura de inundación (Keller & Blodgett, 2007).

Crecida e inundación fluvial no deben ser confundidos; una creciente corresponde a la ocurrencia de un *peak* de caudal sin desbordamiento, en cambio una inundación es la ocurrencia de caudales suficientemente grandes que salen de su cauce, de esta forma una creciente puede o no causar una inundación, como también una inundación puede o no provenir de una creciente (e.g. elevación del nivel del mar, represamientos) (Monsalve, 1999). La fase de crecida, comienza, cuando se sobrepasa el nivel medio establecido, esperando que comience una inundación; una vez que el caudal se sitúa por debajo del nivel de crecida, el río se encuentra en fase de encausamiento (Strahler & Strahler, 1992).

El proceso natural deviene peligroso cuando el hombre ocupa las zonas inundables desconociendo la función natural de éstas áreas, transformando el fenómeno en una amenaza para el asentamiento humano instalado. El nivel de peligro dependerá de la ubicación del asentamiento con respecto al cauce y del intervalo de recurrencia o tasa de retorno (T), entendido como el tiempo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud determinada (Aparicio, 1989; OEA, 1993; Walsh *et al.*, 1994; Chow *et al.*, 1994; Keller & Blodgett, 2007). Generalmente, cada sistema fluvial tiene su propio período de retorno, siendo las terrazas inferiores, las que se inundarán con mayor frecuencia y con una magnitud de flujo más elevada. Cuando el peligro se materializa, se produce la catástrofe o desastre (dependiendo de la escala de daños), comenzado el conflicto entre el sistema natural y el sistema social; el hombre trata de aminorar o bloquear el efecto de este peligro, a través de las medidas de mitigación estructurales (e.g. gaviones, espigones, canalizaciones) y no estructurales (e.g. legislación de protección de áreas ribereñas, instrumentos de planificación territorial-IPT) (Ayala-Carcedo & Olcina, 2002; Aneas, 2000; Merz *et al.*, 2010; Rojas & Martínez, 2011).

En la generación de inundaciones fluviales intervienen factores condicionantes y detonantes. Entre los factores condicionantes destacan: características climáticas, condiciones hidrológicas previas (humedad, pluviometría), aspectos físicos de la cuenca (e.g. topografía, superficie, forma de la cuenca, densidad y jerarquización de la red de drenaje, litología, cubierta vegetal, uso de suelo, canalizaciones, tipos de suelo) y características de los canales de drenaje (morfología del lecho, geometría del cauce, procesos naturales, obstrucciones) (Geis & Steeves, 1980; Mateu, 1988, en Ollero, 1997; Glavovic *et al.*, 2010; Ntelekos *et al.*, 2010). Los factores detonantes principales corresponden a: precipitaciones continuas, lluvias intensas de corta duración, ciclones, derretimiento de nieve, marejadas, rompimiento y liberación de flujos desde presas y desprendimiento de obstrucciones de hielo (Adhikari *et al.*, 2010). El caudal máximo de los eventos detonados por precipitación tiene directa relación con el tamaño de la hoya y los montos pluviométricos (Peña & Klohn, 1990).

Entre los años 1998-2008, el inventario digitalizado de inundación global (GFI), registró más de 2.900 eventos de inundaciones fluviales en el mundo (Adhikari *et al.*, 2010), la mayoría de ellas causó importantes efectos ambientales, entre los que destacan: fallecimientos (Adhikari *et al.*, 2010; Gaume *et al.*, 2009), empeoramiento de la calidad de vida (Arman *et al.*, 2010; Djordjević *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2008), enfermedades infectocontagiosas (Tapsell *et al.*, 2002), pérdidas económicas en ciudades por actividades no realizadas (Arman *et al.*, 2010; Penning-Rowsell, 1996), pérdidas agrícolas en cultivos y ganadería (Rahman & Nawaz, 2011) y deterioro de la infraestructura vial y ferroviaria (Arman *et al.*, 2010; Djordjević *et al.*, 2011; Gaume *et al.*, 2009). De no asumir medidas de mitigación ante el Cambio Climático Global, los costos se estiman entre un 5% al 20% del PIB mundial; si las medidas son adoptadas las pérdidas se reducirían al 1% (Stern, 2007).

1.2 Las Inundaciones Fluviales en Chile

Las características geográficas del territorio chileno continental: variedad climática zonal, relieves montañosos, cambios ambientales, derivados principalmente de la gran presión de uso antropogénico durante las últimas dos décadas, y el poblamiento de las llanuras fluviales, hacen de Chile un país vulnerable a la ocurrencia de inundaciones fluviales. En el periodo 1960-1991, se registraron 23 eventos de inundaciones y sequías en territorio nacional; de ellas el 64% correspondió a inundaciones y 36% a sequías. Espacialmente, los eventos de inundaciones estuvieron distribuidos desde la I Región de Tarapacá hasta la IX Región de los Lagos; sin embargo, la mayor concentración de ellos se produjo entre la V Región de Valparaíso y la X región (Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993). Dicha área comprende a la zona mediterránea chilena (río Aconcagua hasta el río Biobío por el sur), en la que reside el 73% de la población nacional (INE, 2002), concentrada en grandes 3 grandes áreas metropolitanas (e.g. Santiago, Valparaíso y Concepción), y en cuatro ciudades intermedias: Rancagua, Curicó, Talca y Chillán.

Los factores que dan origen a las inundaciones fluviales en Chile, pueden ser categorizados en factores zonales y azonales (Rojas *et al.*, 2014). Los factores zonales responden a la característica del sistema morfoclimático que da origen al proceso de inundación; dinámica precipitación-escurrimiento (régimen nival, nivo-pluvial, pluvial) y los GLOFs (*Glacial Lake Outburst Floods* o *jökulhlaups*). Los factores azonales, pueden ocurrir en cualquier parte del país, no siendo dependiente de la característica morfoclimática de la región donde se produce el evento; entre estos destacan el volcanismo, sismicidad y el factor antrópico principalmente asociado a las fallas o vaciamiento repentino de infraestructura hidráulica. Sin embargo, factores azonales y zonales, generalmente interactúan, produciendo un efecto de sinergia en los procesos de inundación.

La precipitación corresponde al primer mecanismo para producir inundaciones, sean éstas de origen convectivo, orográfico o frontal. La precipitación en la ladera occidental andina del dominio árido (18°-26° S) se asocia a génesis convectiva durante el verano austral, y aumentan durante la fase fría de El Niño Oscilación del Sur (ENOS). De esta forma los ríos de régimen esporádico del norte y centro del desierto de Atacama tienden a producir inundaciones desde sus cabeceras hasta el mar, durante la fase estival (e.g. ríos San José, LLuta) (Campos *et al.*, 2007; Vargas *et al.*, 2000; Vuille & Keimig, 2004; Houston, 2006; Niemeyer & Cereceda, 1984).

La zona andina del dominio semiárido (26°-32° S), experimenta una progresiva disminución de la precipitación estival, que resulta en algunas crecidas ocasionales en pequeños ríos efímeros bajo condiciones La Niña. En general en esta área, las crecidas de los ríos, son resultado de la fusión de nieve acumulada durante el invierno anterior, especialmente bajo condiciones ENOS cálidas. La zona costera del dominio árido e interior del semiárido, se ven ocasionalmente afectadas por precipitaciones frontales

que se incrementan de norte a sur en invierno, activando inundaciones principalmente en algunas cuencas costeras (Ortileb, 1995; Houston, 2006).

En la zona mediterránea (32°-38° S), los desbordes fluviales se relacionan con la ocurrencia de sistemas frontales fríos y cálidos, intensificados durante el ENOS cálido hasta el río Cautín (38° S) (González, 1987; Rebolledo, 1987; Muñoz, 1990; Caviedes, 1998). En las cuencas andinas de esta zona, los sistemas frontales cálidos causan el ascenso en altitud de la isoterma cero, lo que incrementa el área aportante contribuyendo a la generación de inundaciones violentas (Quintanilla, 1995; Kovacic, 1991; Carrasco *et al.*, 2005). En tanto, en las cuencas costeras, los sistemas frontales fríos producen intensas precipitaciones, que derivan en crecidas fluviales con efectos catastróficos (Mardones & Vidal, 2001; Rojas *et al.*, 2010).

En el dominio templado húmedo (38°-43° S) se registran precipitaciones durante todos los meses del año con un máximo invernal, las que ocasionan inundaciones fluviales y lacustres (Rojas & Mardones, 2003; ONEMI, 2011). En la zona austral, en el dominio templado frío (43°-55° S), las precipitaciones son abundantes todo el año, principalmente en la ladera barlovento de la cordillera andina (Quintana & Aceituno, 2012). Inundaciones severas se han registrado en sectores donde la descarga fluvial alimentada por lluvias intensas se ha mezclado con altas cargas de sedimentos (*e.g.* río Las Minas) (Harambour, 2012).

La actividad volcánica es continua en el territorio chileno continental, exceptuando la región comprendida entre 28°-33° S y 46°-48° S (González-Ferrán, 1995). La relación procesos volcánicos e inundaciones fluviales radica en la ocurrencia de dos fenómenos principales: (1) obstrucción de cauces fluviales por lahares o flujos de lava (*e.g.* Río Lontué por volcán Peteroa en 1762), (2) por aumento repentino del caudal derivado de la interacción glacio-volcánica (Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993; Lara, 2009). En ambos casos, los ríos pueden experimentar grandes crecidas en alguna sección de su recorrido.

La interacción glacio-volcánica actúa por flujos laháricos y *Jökulhlaup*. En la zona sur gran parte de los flujos laháricos terminan su recorrido en un lago (*e.g.* Lago Villarrica y Calafquén), el que actúa como regulador impidiendo la propagación de la crecida; cuando lo anterior no ocurre, el lahar puede continuar por el cauce con amplio poder destructivo (*e.g.* Río Teno por volcán Peteroa 1837) (Carrión, 2010; Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993; Lara, 2009).

Los *Jökulhlaups*, son crecidas de corta duración y elevada magnitud, producidas por descarga repentina de lagos subglaciares, generalmente desencadenada por actividad geotérmica (Alho *et al.*, 2005; Howard *et al.*, 2012; Björnsson, 2002; CECS, 2009). Eventos de este tipo han sido reportados para el río Cachapoal en 1847 y Huemules en 1973, en relación a la actividad geotérmica de los volcanes Palomo y Hudsón, respectivamente (Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993; González-Ferrán, 1995; Peña & Klohn, 1990).

Las crecidas nivo-glaciares son detonadas por fusión nival o glaciaria o por procesos de GLOF (*Glacial Lake Outburst Flood*)/IDLOF (*Ice-Dammed Lake Outburst Flood*). Su ocurrencia se asocia frecuentemente a variaciones pluviotérmicas estacionales (ríos con régimen nival o nivo-pluvial) o a variaciones térmicas relacionadas hipotéticamente al Cambio Climático Global, que producen fusión acelerada de mantos de hielo y/o nieve. Las crecidas nivales se producen desde el dominio semiárido al mediterráneo (e.g. ríos Copiapó, Aconcagua, Mapocho, Tinguiririca y Maule) (Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993).

Los GLOFs son inundaciones catastróficas desde lagos glaciares represados por morrenas o combinación hielo-morrena; los IDLOFs competen a descargas catastróficas desde lagos sub, intra o supraglaciares, producto de la ruptura del hielo que los represaba (Breien *et al.*, 2008; CECS, 2009; Carrión, 2010; Worni *et al.*, 2012). En Chile, inundaciones por GLOFs/IDLOFs se han producido desde lagos represados por glaciares (e.g. río Colonia 2008 y 2009); por vaciamiento de lagos formados por avance de lenguas glaciares que interceptan un cauce lateral (e.g. ríos Olivares en 1954) y por desprendimiento de hielo sobre lagos o lagunas, desencadenando el colapso de morrenas frontales (e.g. río Soler, 1993) (Dussailant *et al.*, 2010). Este tipo de crecidas presentan una gran violencia según el tiempo base del hidrograma, sin embargo el caudal máximo alcanzado dependerá del mecanismo de vaciamiento (Peña & Klohn, 1990).

Megadeslizamientos causados por sismos o por lluvias intensas pueden formar presas naturales y posteriores inundaciones catastróficas (Peña & Klohn, 1990; Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993). Deslizamientos cosísmicos han desencadenado inundaciones severas en el valle del río San Pedro y Calle-Calle, con efectos destructivos para la ciudad de Valdivia, producto de los terremotos de 1575 y 1960, con prolongados tiempos bases del hidrograma y caudales máximos importantes (Peña & Klohn, 1990; Rojas & Mardones, 2003).

Las inundaciones relacionadas con intervenciones antrópicas, se producen por rotura, mal manejo o vaciamiento repentino de infraestructura hidráulica (e.g. falla de compuerta de tranques, exceso de caudal en canales, falta de limpieza de canales, etc.). Los procesos vinculados a este tipo de inundación actúan en ocasiones combinados, ejemplo de ello son los desbordes recurrentes del tranque Tutuven en la región del Maule (Urrutia de Hazbún & Lanza, 1993; Vargas & Langdon, 2007).

A nivel de efectos, los temporales de 1982 y 1986 (asociados al fenómeno de El Niño), dejaron un saldo a nivel nacional de: 98.000 damnificados, 8.699 viviendas dañadas, 68 puentes destruidos, 53 caminos cortados, 36 fallecidos y 814 heridos (Rodríguez, 1999). Los daños en infraestructura y labores productivas de los eventos de 1982, 1984 y 1986, superaron los 55 millones de dólares (Gutiérrez & Larraín, 1986). En la última década, las inundaciones que ocurrieron los años 2000, 2002 y 2006, dejaron: 99.742 damnificados, 272.111 afectados, 11.685 albergados, 26 muertos y 3 personas desaparecidas (Rojas, 2010). En síntesis, los efectos ambientales de las inundaciones en Chile han dejado pérdidas en vidas humanas, deterioro de la infraestructura, días

de paralización de actividades, cultivos y ganadería, entre otros. Esto se traduce en costos millonarios para el Estado y un empeoramiento de la calidad y nivel de vida de la población.

Gran parte de estos daños se concentran en el dominio mediterráneo de Chile Central. Especialmente afectada ha resultado la ciudad de Concepción (36°50' S), localizada en el centro sur de Chile. Las inundaciones fluviales de la ciudad se derivan de su emplazamiento entre los cursos inferiores de la cuenca andina del río Biobío y la cuenca costera del río Andalién (Aros & Vargas, 1985; Peña, 1995; Mardones & Vidal, 2001; Mardones *et al.*, 2001); esta última ha sufrido importantes eventos de inundación y cambios ambientales en las últimas décadas.

1.3 Inundaciones en cuencas hidrográficas costeras de régimen pluvial, localizadas en dominios climáticos mediterráneos.

En el mundo, las cuencas mediterráneas costeras se ubican en la costa central de Chile, en el norte de Baja California y California central en Estados Unidos, en el sur de Europa, suroeste de Australia y costa sur de Sudáfrica. Las cuencas localizadas en estas regiones presentan precipitaciones con régimen estacional, ~75% de la precipitación concentrada en invierno. Estas precipitaciones se asocian a la acción del Frente Polar y al debilitamiento de la acción del Anticiclón Subtropical. La concentración de la precipitación en invierno, confiere una mayor probabilidad de ocurrencia de episodios intensos de lluvia en 24 h (Vannéy, 1970; Beighley *et al.*, 2003; Rutllant, 2004). La concentración de precipitación da lugar a inundaciones invernales, que exponen una elevada recurrencia histórica con una T~2 años de inundaciones de cualquier magnitud; inundaciones pequeñas y medias se presentan con una T~5 años e inundaciones grandes se presentan con una T~20 años (Vannéy, 1970; Alarcón, 1995; Rojas *et al.*, 2010).

En la cuenca del Guadalquivir (SO de España) un 78% de estos eventos se producen durante el invierno, con frecuencia ocurren dos inundaciones fluviales en un mismo invierno (e.g. 1936, 1925-1926) (Vannéy, 1970). En Valparaíso (33° S-Chile), las inundaciones repentinas son provocadas por intensidades de precipitación diaria de aproximadamente 30 mm/24-h, mientras que inundaciones graduales se registran con períodos de precipitación continua de 3 días (Romero & Mendonça, 2009). Este comportamiento de precipitación produce un régimen de caudal pluvial, con caudales de crecida elevados y de estiaje relativamente bajos.

Los montos pluviométricos anuales y diarios pueden ser modificados por la variabilidad climática interanual. En el caso de la zona mediterránea, el ENSO es el principal responsable de esta variabilidad. En cuencas de la costa sur de California el fenómeno El Niño produce precipitaciones sobre lo normal; de los diez años más húmedos de la costa sur californiana, ocho corresponden a años El Niño (Beighley *et al.*, 2003). En relación al binomio inundación-ENSO, para California, se obtiene que al sur de los 35° N existe una correlación positiva y significativa ($r=0.3-0.6$); en la costa central la

correlación no es estadísticamente significativa, mientras que al norte de los 40° N la correlación es negativa (Andrews *et al.*, 2004).

En Chile central, 1/3 de la variabilidad de la precipitación se explica por el fenómeno ENSO. En condiciones El Niño el agua caída puede superar en más de un 100% el total anual de un año normal, traducidos en un mayor número de días con precipitación de una intensidad mayor; estacionalmente se produce precipitación superior a la media en invierno entre los 30°-35° S, mientras que entre los 35°-38° S dicha relación se produce a fines de primavera (Montecinos & Aceituno, 2003; Carrasco & Quintana, 2004). En Valparaíso las inundaciones se han producido bajo condiciones El Niño, asociadas a umbrales de precipitación intensa diaria en las últimas tres décadas (30 mm/24-h): 1972, 1982, 1984, 1987 y 1997 (Rutllant, 2004); sin embargo, también se han registrado eventos de inundación en años La Niña y Neutrales (Romero & Mendonça, 2009). Estos resultados son concordantes con aquellos obtenidos por Rojas *et al.*, (2010) en la cuenca costera del río Carampangue (37° S), donde un 52,9% de estos eventos ocurrieron durante años neutros, 35,3% durante la fase cálida del ENSO y un 11,8% en fase fría, además los autores destacan que las inundaciones de mayor magnitud se produjeron durante años neutros.

Asociado a la dinámica de la precipitación, el Cambio Climático Global puede aumentar la severidad y frecuencia de las inundaciones, debido a la elevación del nivel medio del mar (NMM) y a cambios hidroclimáticos como aumentos en la frecuencia e intensidad de las lluvias; se esperan lluvias más agresivas que aumenten la erosión (Chust *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2010; Gallien *et al.*, 2011, Burrell *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2012; IPCC, 2013). Chile ha sido identificado como un país en riesgo de aumento de tormentas e inundaciones fluviales y costeras (Kundzewicz & Schellnhuber, 2004).

En la zona mediterránea chilena, incluyendo la zona baja de la cuenca costera del Andalién, los montos pluviométricos anuales han experimentado disminuciones desde la década de los 70 a la fecha (95% de confiabilidad con data de ~100 años) (Carrasco *et al.*, 2005; Rutllant & Fuenzalida, 1991; DGA, 1999; Falvey & Garreaud, 2009). Sin embargo, a pesar de esta disminución, los eventos de precipitación diaria se han vuelto más intensos hacia fines del siglo XX (Carrasco *et al.*, 2005); se estima que este comportamiento continuará y podría incidir en un aumento importante de caudales máximos. Por otra parte, los eventos de precipitación asociados a sistemas cálidos, se producirán dos veces más en las próximas décadas (Falvey, 2007).

Otro factor a considerar en la ocurrencia de inundaciones, son las mareas. Los ríos exorreicos pueden formar deltas o estuarios, y éstos pueden ser de cuña o mezcla. Las mareas altas son causadas por una conjunción de factores astronómicos, meteorológicos y climáticos (e.g. El Niño puede elevar el nivel del mar entre 0.1m a 0.3m) (Vannéy, 1970; Gallien *et al.*, 2011); estas dificultan el escurrimiento aguas abajo en estuarios con pendientes débiles (Vannéy, 1970; Eliot, 2012). Sincronizada con flujos altos de caudal causados por elevados montos de precipitación, dificultan la evacuación de las aguas; como ha sido demostrado en la ría de Huelva al SO de

España (Morales *et al.*, 2005). En la ciudad de Sevilla (río Guadalquivir) se ha encontrado que la amplitud de la marea se reduce de 10% a un 90% cuando los caudales varían entre $280 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente (Vannéy, 1970).

Por último, diversos estudios han corroborado el incremento de la magnitud de los flujos pico de inundaciones por cambios de usos de suelo (Bronstert *et al.*, 2002; Solín *et al.*, 2011; Brath *et al.*, 2006; Wheeler & Evans, 2009; Banasik & Pham, 2010; Panahi *et al.*, 2010). La proporción de suelos en proceso de desertificación y erosión (degradación) en áreas mediterráneas rurales, se ha incrementado por procesos de sequías, incendios e inundaciones. La actividad agrícola, el pastoreo, la deforestación (principalmente en sectores de cabecera de las cuencas), la forestación en corto y mediano plazo contribuyen a aumentar las inundaciones (Tu *et al.*, 2005; Hooke, 2006; Chu *et al.*, 2010; Wheeler & Evans, 2009).

En zonas urbanas el aumento de las zonas impermeables y una reducción de la infiltración han provocado picos más altos en las inundaciones por descargas más rápidas (Suriya & Mudgal, 2012; Wheeler & Evans, 2009; Beighley *et al.*, 2003). En cuencas costeras de California, la expansión de las ciudades (1929-1998-2050), se tradujo en un incremento de la escorrentía máxima anual de $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (aumento del 300%). Pero el crecimiento de áreas urbanas también puede aumentar la frecuencia de las inundaciones, al promover un manejo inadecuado de los cauces y de las planicies de inundación, produciendo un mayor confinamiento de los sistemas fluviales (Nirupama & Simonovic, 2007; Maaskant *et al.*, 2009; Vidal & Romero, 2010).

En Chile, a partir del Decreto Ley 701 de Fomento Forestal de 1974, comenzó la plantación de *P. Radiata* a gran escala, concentrada principalmente en suelos degradados de cuencas costeras localizadas en zonas mediterráneas, lo que ha causado que en la actualidad sea el uso de suelo predominante en dichas áreas (Bonilla *et al.*, 2002; Frêne & Núñez, 2010). La actividad forestal repercute directamente sobre la escorrentía: exporta una cantidad de sedimento mayor en comparación a un suelo con bosque nativo 305 y $368 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente; disminuye la tasa de infiltración de suelo $\approx 10 \text{ mm h}^{-1}$; presenta suelos con hidrofobia, efecto que se observa comúnmente en áreas forestadas con Eucaliptus y *P. Radiata*; además luego de un incendio forestal se incrementa la escorrentía hasta en un 85%, producto de la destrucción del sotobosque (Gayoso e Iroumé, 1995; Huber *et al.*, 2010; Oyarzún *et al.*, 2011). Durante las crecidas la gran cantidad de sedimento que es transportado, puede llegar a contribuir con un 50% del volumen total de la corriente (Börgel, 1983).

En Chile mediterráneo, extensas planicies de inundación han sido ocupadas por asentamientos urbanos o por uso agrícola, ignorándose la función natural de estas áreas; frente a la mayor variabilidad e intensidad diaria de las precipitaciones en invierno, particularmente en las cuencas costeras de régimen pluvial surgen las siguientes preguntas: (1) ¿Cuál es el factor detonante más significativo en la generación de las inundaciones fluviales en el dominio mediterráneo chileno?, (2) ¿Tiene el CCG implicaciones a escala local en el incremento de intensidad de las precipitaciones y en

consecuencia, en la mayor frecuencia de inundaciones, registradas en las últimas décadas?, (3) ¿Cuál es la relación entre la ocurrencia de episodios ENSO cálidos y la ocurrencia de inundaciones?, (4) ¿Cuál es la relación de las inundaciones históricas con los niveles de mareas, y cómo potenciales aumentos del NMM atribuidos al CCG pueden incidir en estos eventos?, y (5) ¿Cómo las transformaciones físicas del cauce y de la planicie de inundación se relacionan con la mayor magnitud de los efectos de las inundaciones, registradas en las últimas décadas?. Para resolver estas preguntas se ha seleccionado la cuenca del río Andalién; que presenta los problemas científicos señalados, tiene buena accesibilidad, y corresponde a una de las cuencas más urbanizadas en las últimas décadas por el crecimiento del Área Metropolitana de Concepción (AMC).

2.-HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis

H1. En el curso inferior de la cuenca del río Andalién las precipitaciones extremas concentradas en 1 a 3 días consecutivos, han experimentado una tendencia significativa al aumento, que se relacionaría con el Cambio Climático Global y el ENSO; estos cambios se expresarían en una mayor frecuencia de inundaciones fluviales.

H2. El río Andalién forma un estuario de mezcla, por lo cual se postula que los eventos históricos de inundación fluvial con efectos ambientales importantes se relacionarían de manera significativa con la ocurrencia de mareas de sicigia y potenciales aumentos del NMM atribuidos al Cambio Climático Global.

H3. En la sección inferior del río Andalién, las transformaciones físicas del cauce fluvial y su entorno producidas por la expansión urbana (usos residenciales, caminos, puentes), se han traducido en una modificación hidráulica del cauce y de las planicies de inundación; estos cambios se expresarían en una mayor magnitud de los efectos provocados por eventos de inundaciones fluviales.

2.2 Objetivo general

El objetivo general de esta investigación es Analizar, explicar y evaluar las relaciones entre cambios ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en la sección inferior de una cuenca costera del centro sur de Chile. Para el logro de este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

2.3 Objetivos específicos

1. Analizar la recurrencia y efectos ambientales de las inundaciones fluviales históricas en el territorio chileno continental (Publicación 1)
2. Determinar el comportamiento de la precipitación extrema con sus periodos de recurrencia, en el curso inferior de la cuenca del río Andalién (Publicación 2)
3. Determinar tendencias de precipitaciones generadoras de inundaciones fluviales, definiendo vínculos entre su ocurrencia y la variabilidad climática asociada al Cambio Climático Global y al ENSO (Publicación 2)
4. Explicar el efecto de mareas históricas y potenciales aumentos del nivel del mar atribuidos al Cambio Climático Global en la bahía de Concepción sobre las inundaciones fluviales en el curso inferior de la cuenca (Publicación 3)
5. Evaluar y zonificar en el curso inferior del río Andalién áreas de peligrosidad de inundación fluvial para tasas de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, determinando cambios de ocupación por parte de la población en dichas zonas entre 1943-2011 (Publicación 4)

3.-MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de Estudio

La cuenca del río Andalién (715 Km²), se ubica en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa (36°42' S y 36°56' S. 72°36' O y 73°04' O.), región del Biobío (Fig. 1). Administrativamente comprende parte de las comunas de Florida (59,7%), Concepción (32,3%), Penco (4%), Talcahuano (0,7%) y Tomé (3,3%) (Niemeyer, 1982; Hernández, 1999; Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2012; Narbona, 2005; Jaque, 2010). Es un sistema fluvial exorreico, dendrítico, de régimen pluvial de quinto orden. Drena los cordones costeros graníticos desde las comunas de Florida a Concepción, desemboca en la bahía del mismo nombre, tras recorrer 42,3 Km. Su caudal promedio anual alcanza los 14,3 m³ s⁻¹ en la estación de cierre de la cuenca, y llega a 565 m³ s⁻¹ durante una crecida de T=50 años. El tiempo de concentración de la cuenca se ha estimado entre 10-12 h, momento desde el cual comienzan a manifestarse los daños, con un *peak* de crecida 18 h después de iniciado el evento de precipitación. Su principal afluente en la sección inferior de la cuenca corresponde al estero Nonguén, que aporta el 13% de su caudal en crecidas, pero por su corto recorrido, pendiente longitudinal y situación climática más expuesta a los vientos húmedos del Oeste, es relevante en la producción de inundaciones.

El clima de la cuenca, está condicionado por sus características de ladera barlovento de la Cordillera de la Costa, con fuerte influencia marítima y precipitaciones frontales y orográficas (Mardones *et al.*, 2001). Devynck (1970), identifica dos tipos de clima: tipo V

y tipo VII. El tipo V, presenta 4 meses fríos y húmedos bien marcados, agrupa el 70% de la precipitación en la cuenca, con montos entre 1.200-1.400 mm y una media térmica de 13°C, este tipo afecta casi la totalidad del territorio de la cuenca. En el tipo VII, las precipitaciones sufren control orográfico, lo cual aumenta sus montos hasta llegar a los 1.600 mm, principalmente en el sector sudoeste, sector donde se emplaza la subcuenca del estero Nonguén.

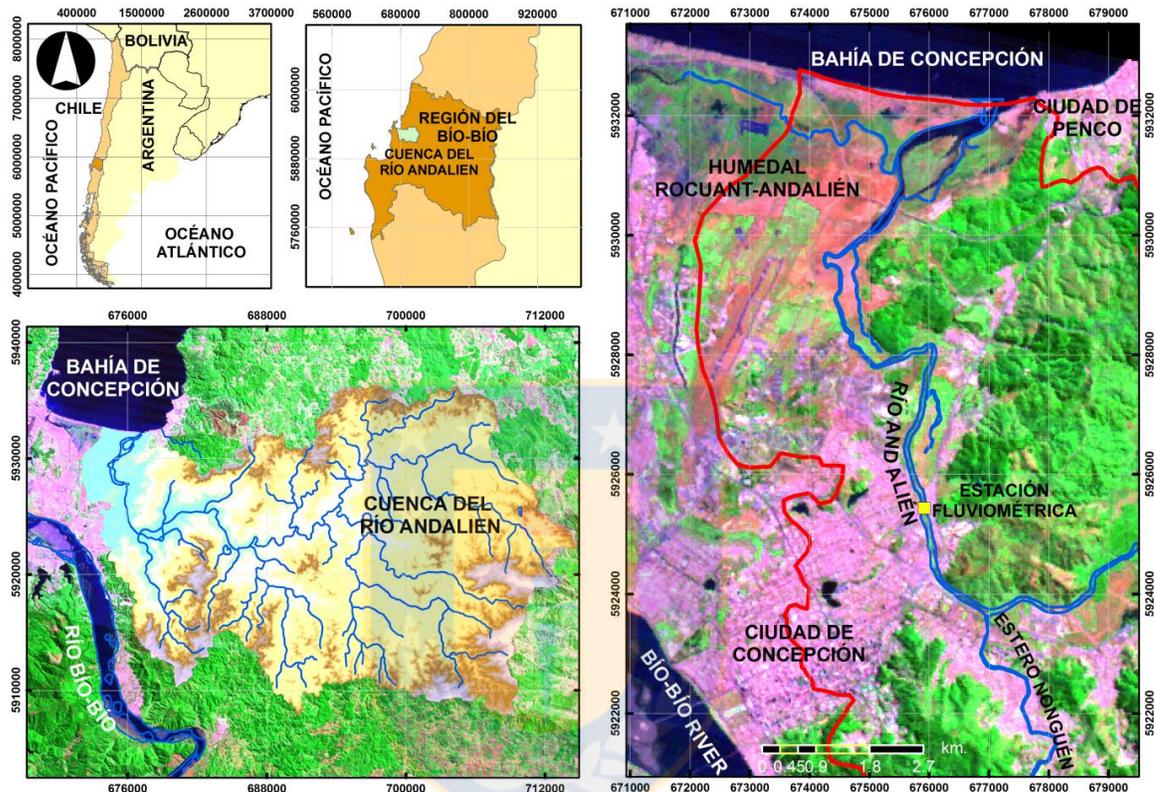


Fig. 1 Área de estudio general. Línea roja indica límite de la cuenca.

A nivel geomorfológico se observan relieves de erosión (cordones graníticos y plataformas graníticas) y relieves de acumulación (valles y terrazas fluviales, llanuras hidromorfas, cordones litorales, marismas y dunas). Corresponde a una cuenca predominantemente montañosa, donde los cordones graníticos ocupan más del 60% de la superficie. Las plataformas graníticas ocupan 20% de la superficie total, mientras que las terrazas y llanuras del curso inferior, representan la menor extensión. Los valles locales, llegan al 15% de la superficie, distribuidos por toda la cuenca (Jaque, 1996).

3.2 Inundaciones y cambios ambientales: Cuenca del Andalién

La cuenca del río Andalién presenta una alta recurrencia histórica de eventos de inundación fluvial. En los últimos años se ha desbordado en su curso inferior en varias oportunidades a causa de intensos eventos de lluvia: año 2000 (3 temporales consecutivos); año 2001 (140 mm/72-h en el mes de agosto); año 2002 (119 mm/24-h en el mes de agosto); año 2006 durante el mes de julio (Inostroza, 2005). Esta cantidad

de eventos resulta en elevadas tasas de retorno; las inundaciones moderadas (afectando a 15 familias) se presentan cada 4,76 años, mientras que las inundaciones graves (298 familias) cada 20,6 años (Alarcón, 1995). Las pérdidas han sido millonarias (3.695 millones de pesos en el evento de junio de 2005), más aun considerando que esta zona corresponde a un área muy poblada con algunos sectores económicamente deprimidos (Vidal *et al.*, 2001; Narbona, 2005; Vidal & Romero, 2010).

En cuencas costeras, la precipitación líquida concentrada en un corto período de tiempo es el principal detonante de estos procesos, con umbrales de precipitación diaria superior a 80 mm y acumulación de lluvia en 3 días consecutivos superior a 140 mm, que imposibilitan que el proceso de infiltración se desarrolle en forma normal, lo que afecta el almacenamiento y aumenta la escorrentía directa. En Concepción, los episodios con cinco días de precipitación continua, son habituales con 124 mm/24-h en junio de 1974 y 2006 (Peña *et al.*, 1993; Mardones *et al.*, 2001; Mardones & Vidal, 2001; Jaque, 2010), pudiendo llegar a 170 mm/24-h para T=50 años (Narbona, 2005). Mardones *et al.*, (2004), concluyen que un 43% de las lluvias que presentan intensidades 100 mm/24-h se producen en años El Niño.

Como se ha señalado previamente, los cambios de uso de suelo también pueden ser un modificador de los regímenes de caudales. Los suelos de esta cuenca han sustentado diversas actividades productivas desde la Colonia, que provocaron una degradación del suelo importante en los dos últimos siglos. El bosque mixto fue rozado para el cultivo de trigo y posteriormente para ganadería, dando lugar a procesos de impermeabilización y posteriormente a erosión laminar y cárcavas (Mardones *et al.*, 2001). En 1999, el 55% de la cuenca sustentaba una actividad preferentemente forestal de pino y eucalipto. El bosque nativo costero e hidromórfico de tipo valdiviano, cubría un poco más del 10% de la superficie total, en quebradas y laderas de pendientes fuertes; el uso agrícola-ganadero representaba el 15,9% de la cuenca.

Los cambios ambientales de este sistema se han traducido en una degradación del medio natural, debido a la sobreutilización agrícola y ganadera, tala del bosque nativo, sistemas de cultivos inadecuados, actividades forestales, incendios y quemas forestales, que significaron que un 18% de la cuenca fuera afectada por procesos de erosión de suelo, desde erosión de manto a extensas áreas de cárcavas (Jaque, 1996). En el período 1992-2008 la superficie erosionada de la cuenca aumentó a un 36%, la cobertura vegetal disminuyó de un 72,2% a un 69,03% en el mismo período (CONAF, 2008). Al 2006 se calculaba en un 10% el territorio con alto riesgo de erosión potencial (76 Km²), localizado preferentemente en el curso medio y superior, en laderas de solana y sotavento (Bravo, 2006).

El uso urbano no representa más de un 3% del territorio de la cuenca, constituido por la zona urbana de Florida (150 ha) y parte del área metropolitana de Concepción, esta última caracterizada por una dinámica de densificación y expansión horizontal hacia el río Andalién desde la segunda mitad del siglo XX (Jaque, 1996; Hernández, 1999). En gran parte provocada por el crecimiento de población del Gran Concepción, que pasó de 234.942 habitantes en 1960 a 541.126 en 2002 (INE, 2002), lo que se tradujo en un

incremento de la superficie urbana en un 300% entre 1955 al 2007. El crecimiento urbano más alto se concentra en el curso inferior de la cuenca del Andalién, alcanzó un 700% entre 1955 y 2007, el que se vio reflejado en el aumento del coeficiente de escorrentía (CE) en 72% (Vidal & Romero, 2010). La urbanización en esta zona se produjo sobre el sistema de humedales Rocuant-Andalién, riberas y lechos de río; que han confinado grandes tramos del río Andalién, con efectos ambientales en: biodiversidad, reducción de hábitat, deterioro de cubierta vegetal y un aumento importante de las áreas afectadas por anegamientos e inundaciones (Azócar & Sanhueza, 1999; Pauchard *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2009; Smith & Romero, 2009; Rojas & Plata, 2010; Salinas & Pérez, 2011).

3.3 Métodos

La recurrencia y efectos ambientales de inundaciones históricas se analizaron mediante revisión crítica de los periódicos y fuentes secundarias, que proporcionaron importante información sobre eventos de inundación, no registradas instrumentalmente. Los datos de precipitación se obtuvieron de las estaciones Carriel Sur, Nonguén y Caracol (1960-2010). El comportamiento de la precipitación extrema y los períodos de recurrencia en 24-h se alcanzó aplicando 5 distribuciones de probabilidad: Gamma, LogNormal III parámetros, LogNormal, LogPearson y Gumbel. Posteriormente, la relación ENSO-precipitaciones se determinó mediante correlación Rho de Spearman; y para la relación de ENSO-inundaciones, se utilizó Chi-cuadrado. Las tendencias de las precipitaciones extremas vinculadas al CCG se obtuvieron mediante la prueba de Mann-Kendall y el Estimador Sen.

El análisis del efecto de las mareas en las inundaciones, se realizó mediante caracterización de variables físico-químicas para determinar diferentes ambientes de la sección inferior de la cuenca, aplicando análisis de conglomerados y de varianza ANOVA. Posteriormente se realizó simulación numérica en una-dimensión (1D) utilizando el software Hec-Ras 4.1-HECgeo-RAS 4.3.1 en ArcGIS 9.3 (1D) para 5 escenarios de marea y un caudal extremo para $T=100$ años. Los datos topo-batimétricos se obtuvieron de 2 vuelos LIDAR y ecosonda GARMIN.

Las áreas de peligrosidad y las transformaciones físicas derivadas de la expansión urbana se estudiaron mediante interpretación de fotografías aéreas para períodos de tiempo de ≈ 11 años (1943-2011), georreferenciadas mediante instrumental GPS doble frecuencia. Se aplicó un modelo de riesgo, que consideró la interacción de tres factores; Amenaza (HR), Recurrencia histórica (RH) y vulnerabilidad (V_T). La peligrosidad se obtuvo del modelo hidráulico (1D) utilizando el software Hec-Ras 4.1-HECgeo-RAS 4.3.1 en ArcGIS 9.3. La RH mediante encuestas. Y la V_T de datos del Censo 2002 (INE, 2002). El riesgo fue calculado para períodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Las técnicas y métodos para resolver los objetivos específicos, se describen detalladamente en los capítulos respectivos.

4.-RESULTADOS

4.1.- Capítulo 1. Inundaciones fluviales en Chile continental (1574-2012).

Rojas, O. Mardones, M. Aguayo, M. y Arumí, J.L. (2014). Una revisión de las inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, tipologías y efectos geográficos. Revista de Geografía Norte Grande. Vol. 57. 177-192

Resumen

Una revisión bibliográfica de inundaciones fluviales históricas en el período 1574-2012 a través de diferentes publicaciones, permite analizar, explicar y sistematizar causas o factores detonantes, periodos de recurrencia, distribución y efectos geográficos de las inundaciones acaecidas en Chile continental. Según el factor detonante se identifican 5 tipos principales de inundaciones asociadas a: procesos volcánicos, procesos nivoglaciares, deslizamientos, intervenciones antrópicas y precipitaciones; estas últimas causan el 71% de las inundaciones en el período analizado. A nivel nacional, se observa un patrón zonal de los tipos de eventos dividido en 5 áreas homogéneas, cuya mayor recurrencia se concentra en el dominio climático mediterráneo, consistente con montos pluviométricos intensos y cambios ambientales ocurridos durante las últimas tres décadas. Se constata un incremento de inundaciones catastróficas, relacionadas principalmente con procesos nivoglaciares e intervenciones antrópicas, desde la segunda mitad del siglo XX a la fecha.

Palabras claves: inundación fluvial, inundaciones históricas, peligro natural, tipos de inundaciones, Chile.

Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos¹

Octavio Rojas², María Mardones³, José Luis Arumí⁴ y Mauricio Aguayo⁵

RESUMEN

Una revisión bibliográfica de inundaciones fluviales históricas en el período 1574-2012 a través de diferentes publicaciones, permite analizar, explicar y sistematizar causas o factores detonantes, periodos de recurrencia, distribución y efectos geográficos de las inundaciones acaecidas en Chile continental. Según el factor detonante se identifican 5 tipos principales de inundaciones asociadas a: procesos volcánicos, procesos nivoglaciales, deslizamientos, intervenciones antrópicas y precipitaciones; estas últimas causan el 71% de las inundaciones en el período analizado. A nivel nacional, se observa un patrón zonal de los tipos de eventos dividido en 5 áreas homogéneas, cuya mayor recurrencia se concentra en el dominio climático mediterráneo, consistente con montos pluviométricos intensos y cambios ambientales ocurridos durante las últimas tres décadas. Se constata un incremento de inundaciones catastróficas, relacionadas principalmente con procesos nivoglaciales e intervenciones antrópicas, desde la segunda mitad del siglo XX a la fecha.

Palabras clave: inundación fluvial, inundaciones históricas, peligro natural, tipos de inundaciones, Chile.

ABSTRACT

A literature review of river floods from 1574 to 2012, allows us to analyze and identify the causes or trigger factors, recurrence periods, spatial distribution and geographical effects of flooding within continental Chile. Five types of flooding are identified, based on the triggering factor: volcanic processes, snow/glacial processes, landslides, anthropic interventions and rainfalls. Rainfall is responsible for 71% of flooding events during the period studied. We were able to spatial patterns at a national level, allowing us to define five homogenous zones. The area with the most frequent events corresponds to the Mediterranean climatic domain, which has been characterized by intense storms and environmental changes over the last three decades. An increase in catastrophic flooding from the second half of the 20th century to the present was observed, primarily associated with nivo-glacial processes and human interventions.

Key words: flooding, historical floods, natural hazards, types of flooding, Chile.

¹ Los autores agradecen a Programa de Formación Capital Humano Avanzado CONICYT. Gobierno de Chile, Beca Doctorado Nacional 2011 y complemento Gastos Operacionales, y a Dra. Katia Sáez C. del Departamento de Estadística, Universidad de Concepción (Chile).

Artículo recibido el 1 de febrero de 2013, aceptado el 5 de agosto de 2013 y corregido el 7 de noviembre de 2013.

² Departamento de Geografía, Universidad de Concepción (Chile). E-mail: ocrojas@udec.cl

³ Departamento de Geografía, Universidad de Concepción (Chile). E-mail: mmardone@udec.cl

⁴ Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepción (Chile). E-mail: jarumi@udec.cl

⁵ Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción (Chile). E-mail: maaguayo@udec.cl

El Cambio Ambiental Global acelera procesos naturales, degrada el sistema terrestre, y genera episodios más intensos de precipitación (Duarte *et al.*, 2006); que sumado a la construcción de caminos, obras hidráulicas, alteran el régimen de caudal de muchos ríos (Chu *et al.*, 2010; Banasik & Pham, 2010; Olang & Furst, 2011). Por tales motivos se proyecta un aumento de las inundaciones (IPCC, 2007; Eissa & Zaqui, 2011) y de los costos asociados, en las próximas décadas (Stern, 2007).

Las inundaciones fluviales son un proceso natural por el cual el flujo desborda los límites de un cauce (Tockner *et al.*, 2010). Este proceso deviene peligroso cuando el hombre ocupa zonas inundables, transformando el fenómeno en una amenaza para los asentamientos humanos (Keller & Blodgett, 2007). Al materializarse la amenaza, produce catástrofes o desastres, iniciándose el conflicto entre los sistemas natural y social (Merz *et al.*, 2010; Rojas y Martínez, 2011).

Los factores desencadenantes de inundaciones fluviales pueden estar relacionados con diversas causas tales como: precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, fusión de nieve y hielo, descarga de aguas represadas por glaciares, procesos de remoción en masa, rotura de embalses e infraestructura hidráulica y crecidas asociadas a erupciones volcánicas (Ollero, 1997; Adhikari *et al.*, 2010).

Centrado en el meridiano 71° W, Chile se extiende entre los 17° y 56° de latitud S; debido a este largo recorrido latitudinal su territorio comprende un amplio rango de zonas climáticas. Los relieves montañosos dispuestos en sentido longitudinal, cuyas cimas están hacia el sur progresivamente cubiertas de nieve y de glaciares, la actividad sísmica y volcánica, los cambios ambientales derivados de la presión antrópica, alteran las características climáticas zonales controladas por la latitud e incrementan la vulnerabilidad del territorio a la ocurrencia de inundaciones fluviales (Di Castri y Hajek, 1976; Peña y Klohn, 1990).

En el período 1960-1991 se registran 16 inundaciones catastróficas en Chile relacionadas con eventos pluviométricos; el

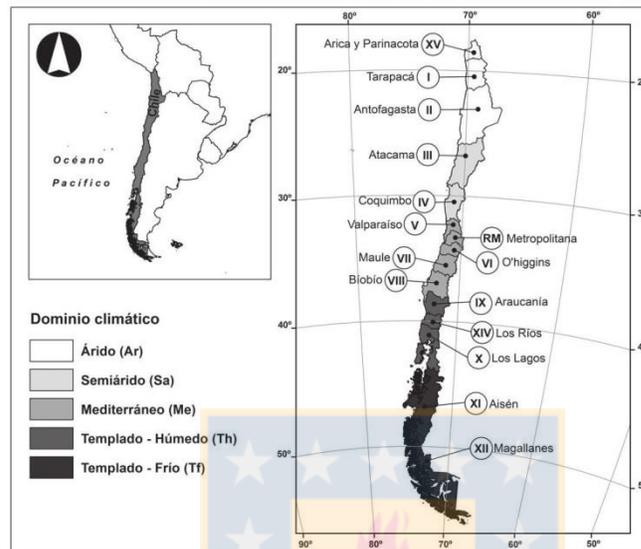
63% afecta la zona central; lugar donde se concentra un 73% de la población nacional (INE, 2012). Diversos estudios (Mariangel, 1990; Smith y Romero, 2009; CIREN, 2010; Rojas *et al.*, 2013) demuestran que en esta área ocurren cambios ambientales profundos en los últimos 30 años, los que también se vinculan con una alta recurrencia de eventos fluviales (González, 1987; Mardones y Vidal, 2001; Romero y Mendonça, 2009). En las últimas dos décadas (1990-2010), nuevas zonas han sido dañadas por inundaciones asociadas principalmente al vaciamiento de lagos glaciares (Dussailant *et al.*, 2010; Carrión, 2010).

De lo anteriormente planteado surgen las siguientes interrogantes: 1) la gran variedad de condiciones geográficas y climáticas propicia la ocurrencia de inundaciones provocadas por distintas causas o factores detonantes; algunos en sintonía con la latitud los que definiremos como factores detonantes zonales y otros, controlados por factores geográficos locales. ¿Cuáles son estas causas o factores detonantes de inundaciones fluviales (zonales y azonales) y en qué regiones de Chile explican la ocurrencia de inundaciones? 2) ¿Qué recurrencia histórica y tendencias presentan los eventos a nivel nacional? 3) ¿Qué efectos geográficos tienen las inundaciones según sus causas o factores detonantes? El propósito de esta investigación es analizar, explicar y sistematizar mediante una revisión bibliográfica, causas o factores detonantes, periodos de recurrencia, distribución y efectos geográficos de las inundaciones fluviales acaecidas en Chile continental en el periodo 1574-2012. Se pretende obtener una visión global que permita comparar a nivel país, cuáles son las regiones con mayor recurrencia de catástrofes y sus tendencias de acuerdo a los cambios geográficos y particularmente climáticos ocurridos en las últimas décadas.

Metodología

Según se observa en la Figura N° 1, el área de estudio comprende las 15 regiones político-administrativas de Chile continental; territorio subdividido en 5 dominios climáticos según la clasificación de Di Castri y Hajek (1976). La investigación implica una revisión, realizada durante el año 2012, de publicacio-

Figura N°1
Área de estudio: regiones administrativas y dominios climáticos



Fuente: Modificado de Di Castri y Hajek, 1976.

nes relacionadas con inundaciones fluviales en Chile, considerando aspectos históricos, climáticos e hidrológicos; en bases de datos científicas (ScienceDirect, Springer Link, Scopus, Scielo), en bases de datos de la Dirección General de Aguas (DGA), libros, tesis y diarios electrónicos.

La revisión se realiza en 28 publicaciones, cuya referencia principal en eventos de inundaciones históricas corresponde al trabajo de Urrutia de Hazbún y Lanza (1993) para el período comprendido entre 1574-1990. Mediante análisis de las diversas fuentes se obtienen las causas o factores detonantes de las inundaciones fluviales en Chile y sus procesos asociados, que se complementan con casos específicos; a su vez, se presentan antecedentes hidrológicos de algunas crecidas en términos de su factor detonante, caudal máximo ($Q_{m\acute{a}x}$ $m^3 s^{-1}$) y tiempo base⁶ del hidrograma.

⁶ Tiempo comprendido entre el comienzo (curva de crecida) y el fin del escurrimiento directo (curva de descenso).

Para determinar la recurrencia regional, tendencias y efectos geográficos de las inundaciones históricas, se construye una base de datos electrónica con 227 eventos de inundación fluvial entre 1574-2012. La base incorpora para cada evento la siguiente información: siglo, mes, año, regiones afectadas, dominio climático, duración del evento (días), antecedentes relevantes y efectos. Los efectos se categorizan según: muertes, damnificados, viviendas, infraestructura vial o pública, agropecuario, minería, comunicaciones y servicios de abastecimiento básicos (e.g. agua potable, electricidad, etcétera). Dada la dificultad de establecer criterios cuantitativos en eventos de inundación antiguos, los daños se evalúan en función de una matriz presencia/ausencia.

La recurrencia histórica de eventos se estudia por regiones, factores causales o detonantes y estacionalidad. Un primer período comprende la totalidad del registro histórico 1574-2012; mientras que el segundo período (1900-2012) se utiliza como control del registro total, además de permitir conocer las tendencias decadales de los eventos. Los efectos

geográficos se analizan según causa o factor detonante de las inundaciones; y se estiman los eventos con mayor número de fatalidades en el siglo XX, según reportes electrónicos de la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI), *The Emergency Disasters Database* (EM-DAT) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Perfiles multivariados son utilizados para identificar áreas homogéneas según los tipos de factores desencadenantes y los efectos geográficos de las inundaciones, con el fin de evidenciar cambios en los patrones de comportamiento latitudinal. Los perfiles se obtienen por estandarización de valores máximos en cada categoría; y permiten un mejor agrupamiento según la similitud de la figura resultante.

Causas o factores detonantes de inundaciones fluviales en Chile

Los 227 casos estudiados revelan cinco tipos de causas o factores detonantes de inundaciones fluviales en Chile continental. Las más frecuentes se relacionan con eventos de precipitación intensa o persistente. De menor asiduidad son aquellas originadas por proce-

dos volcánicos, deslizamientos e intervenciones antrópicas. En las inundaciones derivadas de procesos nivoglaciales se establecen asociaciones entre factores meteorológicos y no meteorológicos (Cuadro N° 1).

La precipitación corresponde al primer mecanismo para producir inundaciones, sean estas de origen convectivo, orográfico y/o frontal. La precipitación en la ladera occidental andina del dominio árido (18° - 26° S) se asocia a génesis convectiva durante el verano austral, y aumenta durante la fase fría de El Niño Oscilación del Sur (ENOS); de esta forma los ríos de régimen esporádico del norte y centro del desierto de Atacama tienden a producir inundaciones desde sus cabeceras hasta el mar, durante la fase estival (e.g. ríos San José, Lluta) (Campos *et al.*, 2007; Vargas *et al.*, 2000; Vuille & Keimig, 2004; Houston, 2006; Niemeyer y Cereceda, 1984).

La zona andina del dominio semiárido (26° - 32° S), experimenta una progresiva disminución de la precipitación estival, que resulta en algunas crecidas ocasionales en pequeños ríos efímeros bajo condiciones La Niña; en general en esta área, las crecidas de los ríos, son resultado de la fusión de nieve acumulada durante el invierno anterior, especialmente bajo condiciones ENOS

Cuadro N° 1

Causas o factores detonantes de inundaciones fluviales en Chile

Factores detonantes	Proceso	Otra especificación
(1) Precipitación (intensidad o persistencia)	Precipitación convectiva y orográfica	
	Precipitación frontal	a) Frente cálido b) Frente frío
(2) Procesos volcánicos (explosión, flujos, depósitos)	Obstrucción del cauce y posterior descarga	
	Fusión de nieve/hielo	a) Flujo Lahárico b) <i>Jökulhlaup</i>
(3) Procesos nivoglaciales	Crecidas nivales (estacionales)	
	GLOFs – IDLOFs (episódicos)	
(4) Deslizamientos	Procesos cosísmicos	Obstrucción de cauce y posterior descarga
	Otros deslizamientos	
(5) Intervención antrópica	Rotura de estructuras hidráulicas	
	Mal manejo de obras hidráulicas	

Fuente: Elaboración propia.

cálidas. Bajo estas últimas condiciones, la zona costera del dominio árido y costera e interior del semiárido, se ven ocasionalmente afectadas por precipitaciones frontales que se incrementan de norte a sur en invierno; de esta forma cuencas costeras se activan y se producen inundaciones (Ortíleb, 1995; Houston, 2006).

En la zona mediterránea (32° - 38° S), las inundaciones se relacionan con la ocurrencia de sistemas frontales fríos y cálidos, intensificados durante el ENOS cálido hasta el río Cautín (38° S) (González, 1987; Rebolledo, 1987; Muñoz, 1990; Caviedes, 1998). En las cuencas andinas de esta zona, los sistemas frontales cálidos causan ascenso de la isoterma cero, proceso que incrementa el área aportante, provocando inundaciones violentas (Quintanilla, 1995; Kovacic, 1991; Carrasco *et al.*, 2005). En tanto, en las cuencas costeras, los sistemas frontales fríos producen intensas precipitaciones, que derivan en inundaciones con efectos catastróficos (Mardones y Vidal, 2001; Rojas *et al.*, 2010).

En el dominio templado húmedo (38° - 43° S) se registran precipitaciones durante todos los meses del año con un máximo invernal, las que ocasionan inundaciones fluviales y lacustres (Rojas y Mardones, 2003; ONEMI, 2011). En la zona austral, en el dominio templado frío (43° y 55° S), las precipitaciones son frecuentes todo el año, principalmente en la ladera barlovento de la cordillera andina (Quintana & Aceituno, 2012). Inundaciones severas se han registrado en sectores donde la descarga fluvial alimentada por lluvias intensas se ha mezclado con altas cargas de sedimentos (e.g. río Las Minas) (Harambour, 2012). El caudal máximo de los eventos detonados por precipitación tiene directa relación con el tamaño de la hoya y los montos pluviométricos (Peña y Klohn, 1990).

La actividad volcánica es continua en el territorio chileno continental, exceptuando la región comprendida entre 28°- 33° S y 46°-48° S (González-Ferrán, 1995). La relación procesos volcánicos e inundaciones fluviales radica en dos fenómenos principales: (1) obstrucción de cauces generada por lahares o flujos de lava (e.g. Río Lontué por volcán Peteroa en 1762), (2) por aumento de flujo derivado de la interacción glacio-volcánica

(Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993; Lara, 2009). En ambos casos, los ríos pueden experimentar grandes crecidas en alguna sección de su recorrido.

La interacción glacio-volcánica actúa por flujos laháricos y *Jökulhlaup*. En la zona sur gran parte de los flujos laháricos terminan su recorrido en un lago (e.g. lago Villarrica y Calafquén), que actúa como regulador impidiendo la propagación de la crecida; cuando lo anterior no ocurre, el lahar puede seguir por el cauce con amplio poder destructivo (e.g. río Teno por volcán Peteroa 1837) (Carrión, 2010; Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993; Lara, 2009).

Los *Jökulhlaups*, son crecidas de corta duración y elevada magnitud, por descarga repentina de lagos subglaciares, desencadenada por actividad geotérmica (Alho *et al.*, 2005; Howard *et al.*, 2012; Björnsson, 2002; CECS, 2009). Eventos de este tipo han sido reportados para el río Cachapoal en 1847 y Huemules en 1973, por actividad geotérmica de los volcanes Palomo y Hudson respectivamente (Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993; González-Ferrán, 1995; Peña y Klohn, 1990).

Las crecidas detonadas por procesos nivoglaciares ocurren por fusión nival o glacial o por procesos de GLOF (*Glacial Lake Outburst Flood*)/IDLOF (*Ice-Dammed Lake Outburst Flood*). Generalmente su ocurrencia está determinada por cambios estacionales (ríos con régimen nival o nivopluvial) o por variaciones térmicas relacionadas hipotéticamente al Cambio Climático Global, que producen fusión acelerada de mantos de hielo y/o nieve. Las crecidas nivales se producen debido a la elevación en altitud de la isoterma cero; ejemplos de estas crecidas se encuentran desde el dominio semiárido al mediterráneo (e.g. ríos Copiapó, Aconcagua, Mapocho, Tinguiririca y Maule) (Urrutía de Hazbún-Lanza, 1993).

Los GLOFs corresponden a inundaciones catastróficas desde lagos glaciares represados por morrenas o combinación hielo morrena; los IDLOFs competen a descargas catastróficas desde lagos sub, intra o supraglaciares, producto de la ruptura del hielo que los represaba (Breien *et al.*, 2008; CECS, 2009; Carrión, 2010; Worni *et al.*, 2012). En

Chile, inundaciones por GLOFs/IDLOFs se han producido desde lagos represados por glaciares (e.g. río Colonia 2008 y 2009); por vaciamiento de lagos formados por avance de lenguas glaciares que interceptan un cauce lateral (e.g. ríos Olivares en 1954) y por desprendimiento de hielo sobre lagos o lagunas, desencadenando el colapso de morrenas frontales (e.g. río Soler, 1993) (Dussailant *et al.*, 2010). Este tipo de crecidas presentan una gran violencia según el tiempo base del hidrograma, sin embargo el caudal máximo alcanzado dependerá del mecanismo de vaciamiento (Cuadro N° 2) (Peña y Klohn, 1990).

Megadeslizamientos causados por sismos o por lluvias intensas pueden formar presas naturales y posteriores inundaciones catastróficas (Peña y Klohn, 1990; Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993). Deslizamientos cosísmicos han desencadenado inundaciones severas en el valle del río San Pedro y Calle-Calle, con efectos destructivos para la ciudad de Valdivia, producto de los terremotos de 1575 y 1960, con prolongados tiempos bases del hidrograma y caudales máximos importantes (Cuadro N° 2) (Peña y Klohn, 1990; Rojas y Mardones, 2003).

Las inundaciones relacionadas con intervenciones antrópicas, se producen por rotura, mal manejo o vaciamiento repentino de infraestructura hidráulica (e.g. falla de compuerta de tranques, exceso de caudal en canales, falta de limpieza de canales, etc.). Los procesos vinculados a este tipo de inundación actúan en ocasiones combinados, ejemplo de ello son los desbordes recurrentes del tranque Tutuven en la región del Maule (Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993; Vargas y Langdon, 2007).

Recurrencia histórica de inundaciones fluviales en Chile

Se registran 227 eventos de inundación fluvial en el período 1574-2012; el 71% de estas se asocian a eventos pluviales por precipitación frontal y convectiva, un 12% a procesos nivoglaciales; un 10% a procesos volcánicos y la menor proporción de crecidas fluviales de carácter catastrófico se vinculan a deslizamientos e intervenciones antrópicas. El siglo XX (1900-2012), concentra un 60% de los casos consignados en los últimos 500 años; durante este período, se incrementan

Cuadro N° 2
Antecedentes hidrológicos de algunas crecidas en Chile

Año	Río	Lat	Causas o factores detonantes	Q _{máx} (m ³ s ⁻¹)	Tiempo base	Otros	Fuente de datos
1985	Manflas	28	GLOF/IDLOF	11.000	15 min	a	1
1954	Olivares	33	GLOF/IDLOF	400	30 min	a	1
1987	Colorado	33	Deslizamiento	>10.000	10 min	a	1
1981	Cachapoal	34	GLOF/IDLOF	150	10 hrs.	a	1
1971	Vn. Villarrica	39	Volcánica	3.500	4 hrs	a, b	1
1960	San Pedro	39	Cosísmicos	7.450	10 días	a	1
1971	Huemules	43	Volcánica	>10.000	s/d	a	1
2006	Biobío	36	Precipitación	15.758	≈ 4 días	c	3
2008 (abril)	Colonia	47	GLOF/IDLOF	2.500	≈ 2 días		2
2009 (marzo)	Colonia	47	GLOF/IDLOF	2.800	s/d		2
1982/3	Paine	50	GLOF/IDLOF	350	20 días	a	1

Notas: (a) Tiempo base del hidrograma en el lugar de inicio de la crecida (b) valor conjunto de 4 esteros del volcán (Vn.) Villarrica (c) en estación Biobío en Desembocadura. s/d: sin datos. (≈) aproximación realizada según lectura del hidrograma de crecida.

Fuente: (1) Peña y Klohn 1990, (2) Dussailant *et al.*, 2010, (3) Vargas y Langdon, 2007.

levemente las inundaciones relacionadas con procesos de nieves y glaciares (14%), mientras que aquellas asociadas a lluvias intensas mantienen un alto porcentaje (68% del total), las causadas por procesos volcánicos e intervenciones antrópicas conservan su baja frecuencia.

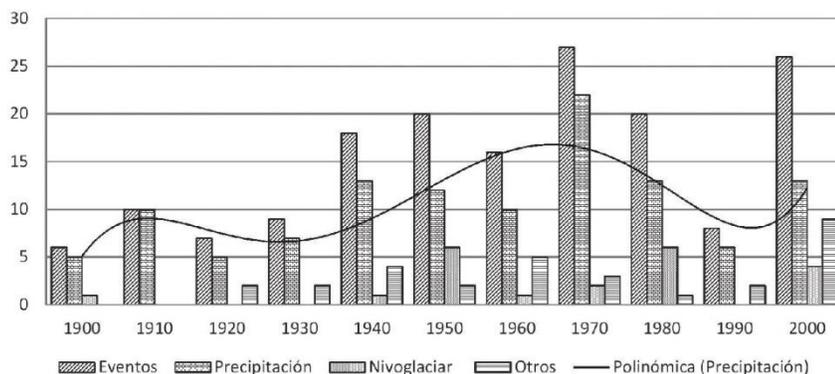
Si se profundiza el análisis a nivel decadal, se constata que en promedio ocurren 15 inundaciones catastróficas por década, para el periodo 1900-2012. Se observa un marcado aumento de los eventos desde la década de 1940 hasta 1970, que decrece desde 1980 para alcanzar un mínimo en 1990, la década del 2000 nuevamente alcanza un número de eventos elevados, similar a los registrados en 1970 (Figura N° 2). Respecto a las causas de los eventos de inundación; las generadas por precipitación, representan en promedio el 73% de las inundaciones por década; aquellas relacionadas a procesos nivoglaciares llegan al 10% promedio a nivel decadal, comenzando a ser importantes desde la segunda mitad del siglo XX. Otras causales intervienen en la dinámica de las inundaciones en forma más esporádica, sin embargo se observa un incremento durante la última década.

La Figura N° 3 muestra la frecuencia por región de las inundaciones fluviales causadas por precipitaciones asociadas a sistemas fron-

tales; históricamente la frecuencia por región no ha variado en forma significativa, estimando los 500 años o los últimos 100 años. Si se focaliza el periodo 1900-2012, en promedio, 57 eventos se reconocen en el dominio mediterráneo y 39 un poco más al sur, en el dominio templado húmedo, zona donde se concentra igualmente la mayor pluviometría del país (Quintana & Aceituno, 2012). Muy inferior es el número de casos promedio regional en el extremo norte (2) y en el dominio templado frío del país (9). En forma consistente con la acción dominante del frente polar, un 66% de las inundaciones se produce en el trimestre invernal (junio-agosto) y un 31% en el trimestre de otoño (marzo-mayo); solo un 3% se reportó en los periodos de primavera (septiembre-noviembre) y verano (diciembre-febrero).

Los eventos de precipitación convectiva, en el periodo 1900-2012, se registran entre la Región de Arica y Parinacota y la Región de Coquimbo, en un 100% durante los trimestres diciembre-febrero y marzo-mayo. Entre las regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta los eventos alcanzan un total de nueve en el periodo analizado asociados principalmente al Invierno Altiplánico; mientras que entre las regiones de Atacama y Coquimbo, los registros muestran un total de tres inundaciones por región en el periodo.

Figura N° 2
Causa o factor detonante de inundaciones por década período 1900-2012



Nota: Otros tipos de inundaciones incluyen (procesos volcánicos, deslizamientos e intervenciones antrópicas).

Fuente: Elaboración propia.

Las crecidas nivales son causa de inundaciones entre las regiones de Atacama y del Maule. La altitud de la cordillera andina entre estas latitudes (≈5.000 a 3.000 msnm) y las precipitaciones generadas por el frente polar que en los pisos de altura se producen en forma sólida, alimentan de nieve las cabeceras de las cuencas fluviales andinas; cuya fusión y descarga a través de los cauces se produce principalmente en primavera e inicios del verano. En el siglo XVI, son reiterados los desastres por inundación en la cuenca del Mapocho; en el período 1900-2012 alcanzan una mayor recurrencia en las regiones de Coquimbo y Valparaíso con un promedio de 4 eventos regionales en el último siglo, uno de los cuales con características catastróficas se reporta en 1972, en Los Andes y San Felipe (Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993). Un 93% de estas inundaciones se produce durante el trimestre diciembre-febrero, es decir corresponde a procesos de fusión tardía de nieve y hielo, mientras que solamente el 7% durante septiembre-noviembre.

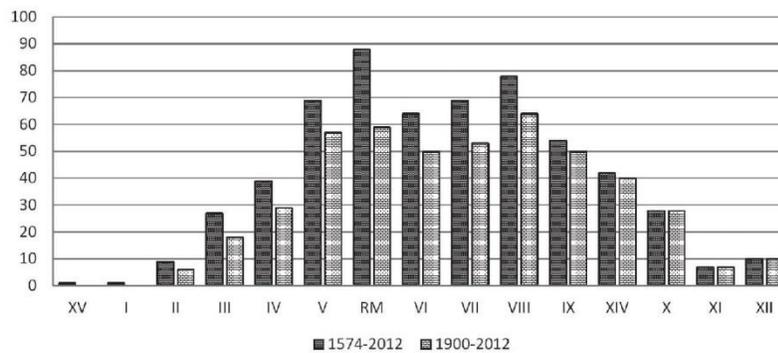
Las inundaciones causadas por GLOFs/ IDLOFs predominan en áreas aledañas a los Campos de Hielo, 12 casos se documentan en la región de Aysén en el último siglo. En las regiones de Coquimbo, Metropolitana, O'Higgins y Magallanes, se reconoce ≈1 evento por región para el mismo lapso; estos

se vinculan principalmente con procesos de IDLOFs, vaciamientos estrechamente relacionados con las fluctuaciones de los glaciares (Carrión, 2010). Las riadas ocurren a nivel estacional: un 66% en el trimestre de verano (diciembre-febrero), un 23% en otoño (marzo-mayo) y solo un 11% en invierno (junio-agosto) y primavera (septiembre-octubre).

De inundaciones causadas por procesos volcánicos se tienen referencias desde el año 1640. Se reconocen 24 descargas fluviales catastróficas en las regiones de O'Higgins, del Maule, de La Araucanía, de Los Lagos y de Aysén. Durante el transcurso del siglo XX, se reportan 18 casos en las regiones de Aysén, Los Lagos y La Araucanía; esta última concentra un 60% de las crecidas asociadas principalmente a los volcanes Llaima (3.125 msnm) y Villarrica (2.847 msnm); las que por regulación lacustre no se propagan aguas abajo.

Se constata un bajo registro documental de inundaciones relacionadas con descarga de presas formadas por procesos de remoción en masa cósmicos, los más importantes se han presentado en la Región de Los Ríos asociado a los terremotos de 1575 y 1960. En las regiones Metropolitana y de O'Higgins han ocurrido deslizamientos asociados a lluvias, que ha ocasionado crecidas en invierno y primavera, con una baja tasa de ocurrencia.

Figura N°3
Inundaciones fluviales por precipitación asociada a sistemas frontales por región en dos períodos 1574-2012 / 1900-2012.



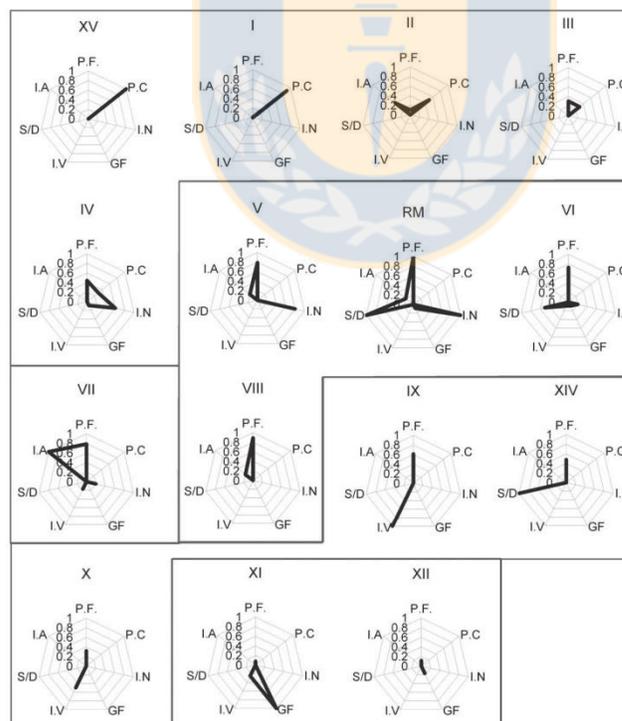
Fuente: Elaboración propia.

Inundaciones provocadas por actividad antrópica se registran desde la región de Antofagasta a la del Biobío, reportándose al menos 10 eventos durante el último siglo. Inundaciones causadas por rotura de estructuras hidráulicas se han reportado en las regiones del Biobío y Maule, esta última concentra un 80% de los eventos a nivel nacional. Por mal manejo de dichas estructuras se han generado inundaciones en las regiones de Antofagasta, Valparaíso, Metropolitana y Maule. Este tipo de inundaciones se registran en cualquier época del año; sin embargo en las últimas dos décadas se concentran en el período de primavera a verano.

Del análisis de las causas o factores detonantes de las inundaciones graficadas en

la Figura N° 4 se deducen 5 áreas homogéneas. Las regiones comprendidas entre Arica y Parinacota a Coquimbo, se caracterizan por escasa influencia de eventos asociados a precipitación frontal y por la ocurrencia de inundaciones por precipitación convectiva. En las regiones Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Biobío, las precipitaciones asociadas al frente polar son la causa más frecuente de inundaciones; secundariamente, se presentan desbordes de cauces por intervenciones antrópicas, procesos de fusión nival y deslizamientos. La región del Maule se destaca del resto del país, particularmente por la ocurrencia de inundaciones asociadas a factores antrópicos; agregados a los cuales se registran casos relacionados a erupciones volcánicas, precipitaciones frontales y fusión

Figura N° 4
Distribución geográfica de las inundaciones en Chile según causa o factor detonante 1574-2012
(perfiles multivariados)



Nota: P.F. Precipitación Frontal; P.C. Precipitación convectiva. I.N. Procesos nivales. GF. GLOFs/IDLOF. I.V. Procesos volcánicos. S/D. Deslizamientos. I.A. Intervención antrópica.
Fuente: Elaboración propia.

nival. Hacia el sur, entre las regiones de La Araucanía y Los Lagos, disminuyen progresivamente los eventos relacionados a precipitación frontal y aumentan aquellos relacionados con el volcanismo y los deslizamientos cosísmicos. Finalmente, en la zona austral (regiones de Aysén y Magallanes) los GLOFs/IDLOFs son causas dominantes de las inundaciones, principalmente en el último siglo.

Efectos geográficos de las inundaciones

Los efectos ambientales de las inundaciones acaecidas en Chile, se traducen en costos millonarios para el Estado y en un deterioro de la calidad y nivel de vida de la población. El efecto más común corresponde a daños en la vivienda; se produce en promedio en un 66% de los casos de inundaciones analizadas en el período 1574-2012, su alta prevalencia, es coherente con el emplazamiento de la población en áreas aledañas a los cauces fluviales.

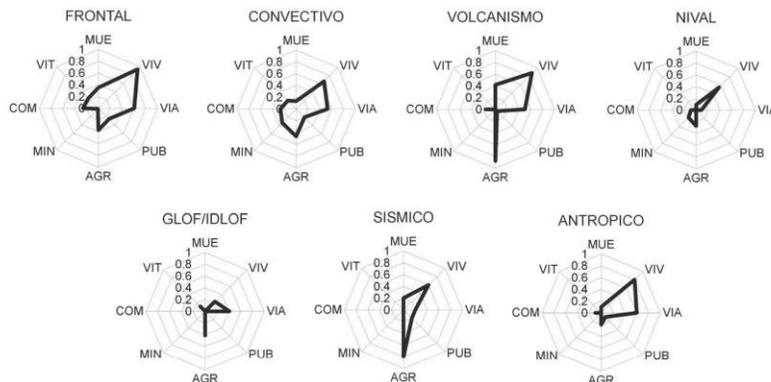
Los decesos, la consecuencia más grave de una crecida, ocurren preferentemente en inundaciones asociadas a volcanismo (41% del total de registros del periodo 1574-2012), tal vez por lo súbito de las descargas fluviales

relacionadas con estos procesos (lahares y *Jökulhlaups*). Igualmente significativo es el número de muertos provocados por inundaciones relacionadas con el paso de tormentas asociadas al frente polar (35%). Los eventos asociados a otros factores detonantes presentan fatalidades en un porcentaje menor al 20% de los casos.

Pero al cotejar las Figuras N° 4 y N° 5, se deduce que los efectos dependen de las regiones y de sus actividades y poblamiento: en el extremo norte desértico, las crecidas asociadas a precipitaciones de origen convectivo devastan las escasas viviendas, las estructuras viales, los emplazamientos agrícolas y mineros. En la zona central, más densamente poblada, donde las precipitaciones vinculadas al frente polar detonan las grandes crecidas, los efectos más relevantes son la destrucción de viviendas, caminos y puentes. En el extremo sur, tan deshabitado como el norte, las descargas producidas por los GLOFs/IDLOFs afectan la ganadería y destruyen los caminos. Aquellos eventos derivados de la sismicidad o el volcanismo, producen efectos relevantes en la agricultura y en la vivienda.

Las 20 inundaciones fluviales registradas en el Cuadro N° 3 para el periodo 1900-2012, dejan un saldo de 1.279 fallecidos,

Figura N° 5
Efectos geográficos de inundaciones fluviales según tipología de evento 1574-2012 (perfiles multivariados).



Nota: Efectos de las inundaciones; MUE.: Muertes. VIV.: Viviendas. VIA.: Vialidad. PUB.: Infraestructura Pública. AGR.: Actividad agropecuaria. MIN.: Minería. COM.: Comunicaciones. VIT.: Servicios de abastecimiento básico.

Fuente: Elaboración propia.

838.687 damnificados y 954.447 afectados. De estas un 80% corresponde a inundaciones generadas por sistemas frontales, que en un 50% afectan un área comprendida por tres o más dominios climáticos; el 15% a inundaciones derivadas de procesos volcánicos, de las cuales solo se dispone de la cantidad de muertes; el restante 5% son inundaciones generadas por las lluvias convectivas del In-

vierno Altiplánico. Los eventos de inundación afectan desde uno a cuatro dominios climáticos, considerando las zonas afectadas por los 20 desastres con más víctimas fatales; el dominio climático mediterráneo concentra un 80% de los peores desastres, seguido por el templado-húmedo (70%), el semiárido (40%) y el árido (15%).

Cuadro N° 3
Inundaciones fluviales con más de 10 muertes en Chile 1900-2012

N°	Región	Mes	Año	D. C.	T.E	Muertos	Damnificados	Afectados	Fuente
1	III a X	Julio	1965	Sa-Me-Th	1	600		375.000	1-4*
2	RM	Mayo	1993	Me	1	109	950	3.276	4-5
3	II	Mayo	1912	Ar	2	80			1
4	V a X	Julio	1987	Me-Th	1	73	116.000		1-4
5	III a X	Julio	1984	Sa-Me-Th	1	70	141.000		1
6	II a X	Agosto	1987	Ar-Sa-Me-Th	1	54	163.000		1-4
7	IX	Abril	1948	Th	3	50			1-2
8	V a XIV	Julio	1974	Me-Th	1	32	40.000		1-4
9	X	Diciem.	1965	Th	3	27			2
10	V a VIII	Junio	1986	Me	1	23	54.118		1-4
11	III a IX	Junio	1997	Ar-Sa-Me-Th	1	22		76.800	4
12	III a IX	Mayo	1957	Sa-Me-Th	1	20	4000		1
13	IV a VIII	Junio	1982	Sa-Me	1	18	18.000		1
14	V a VIII	Julio	2006	Me	1	18	62.416	95.862	3-4
15	V a X	Junio	1958	Me-Th	1	16	3000		1
16	V a XIV	Junio	2000	Me-Th	1	16	100.426	181.667	3
17	IX	Diciem.	1971	Th	3	15			1
18	III a IX	Junio	2002	Sa-Me-Th	1	14	121.777	221.842	3-4
19	IV a X	Julio	1978	Sa-Me-Th	1	12	4000		1
20	RM a VIII	Mayo	1991	Me	1	10	10.000		1
	Totales					1.279	838.687	954.447	

Nota: D.C.: Dominio Climático (Según Figura N° 1); Mue.: Muertos. Dam.: Damnificados. Afec.: Afectados. T.E.; Tipo de evento: (1) Precipitación Frontal, (2) Precipitación convectiva por Invierno Altiplánico, (3) volcanismo por aumento de flujo. *Existe diferencia en el número de víctimas fatales. Fuente: (1) Urrutia de Hazbún y Lanza, 1993 (2) Carrión, 2010 (3) OPS, 2012 (4) EM-DAT, 2012 (5) ONEMI, 2011.

Consideraciones finales

En Chile se observa un patrón zonal de los tipos de inundaciones fluviales relacionado con la distribución de los dominios

climáticos. Las inundaciones ocurridas en el país se clasifican en 5 tipos principales originadas por: intervenciones antrópicas, deslizamientos, procesos nivoglaciares, procesos volcánicos y precipitaciones. De los factores

detonantes analizados, la intensidad o persistencia de la precipitación explica la ocurrencia del 71% de las inundaciones durante los últimos 500 años.

Crecidas provocadas por precipitación convectiva se registran en la cordillera andina del norte de Chile especialmente durante el ENOS frío (Houston, 2006; Vuille & Keimig, 2004). Precipitaciones asociadas al frente polar como causantes de inundaciones ocurren con mayor frecuencia desde el dominio semiárido hacia el sur; consistente con los mayores montos pluviométricos (ubicados en el percentil 99), con umbrales de 40 a 60 mm que se presentan entre los 33° - 35° S y de 60 a 80 mm entre los 35° - 37° S, secciones que corresponden al dominio mediterráneo (Pizarro y Castillo, 2006). Bajo condiciones ENOS cálidas se observan anomalías pluviométricas invernales hasta los 36° S, superando en más de un 100% el total anual de un año normal (Montecinos & Aceituno, 2003; Carrasco y Quintana, 2004).

En los dominios árido y semiárido la escasez de precipitación es coherente con la baja recurrencia histórica de inundaciones registradas en esta investigación; sin embargo la ausencia de vegetación produce flujos concentrados; estas condiciones han desencadenado inundaciones catastróficas de tipo aluvional, en 7 oportunidades en la ciudad de Antofagasta entre 1916 y 1995; vinculadas además al ENOS de moderada o gran intensidad que favorece el debilitamiento del Anticlón del Pacífico Suroriental, y permite ocasionalmente el ingreso de los sistemas frontales hasta la zona costera del dominio árido (Vargas *et al.*, 2000).

Pero es el dominio mediterráneo el que presenta la más alta tasa de recurrencia de inundaciones fluviales asociadas a sistemas frontales, que puede ser explicada tanto por los montos pluviométricos señalados previamente, como por los profundos cambios ambientales experimentados en las últimas décadas, como el avance de la desertificación, erosión de suelos, tala de bosques, expansión de la superficie agrícola y urbana (Henríquez, 2009; CIREN, 2010; Vidal y Romero, 2010). Lo anterior es consistente con lo ocurrido a nivel global (Brath *et al.*, 2006; Chu *et al.*, 2010; Wheeler & Evans, 2009; Suriya & Mud-

gal, 2012); por ejemplo en cuencas costeras de California la escorrentía máxima anual aumentó en un 300% debido a la expansión de la ciudad, pero este último factor también puede aumentar la frecuencia de las inundaciones, por manejo inadecuado del cauce y de la planicie de inundación (Nirupama & Simonovic, 2007).

En el período 2000-2012 es clara la tendencia a nivel nacional de aumento de inundaciones por acción antrópica y procesos de GLOFs/IDLOFs. Estudios recientes relacionan el incremento de estos últimos con el Cambio Climático Global (Xie *et al.*, 2013; Worni *et al.*, 2012); se estima que gran parte de los glaciares de Chile habrían experimentado un retroceso durante los últimos ~100 años (Carrasco *et al.*, 2005), tal como se ha demostrado en la cuenca del Aconcagua (Bown *et al.*, 2008) y en el noroeste de Patagonia (Masiokas *et al.*, 2008), con las consecuencias ya señaladas. Sin embargo, esta primera apreciación puede ser discutible dado que este incremento en las últimas décadas podría estar asociado a un mejor registro documental generado a partir del poblamiento de las zonas australes. Estudios paleohidrológicos podrían contribuir en la comprensión de las tasas de retorno de estos fenómenos, considerando las bajas series de datos hidrológicos (Peña y Escobar, 1983; Dussailant *et al.*, 2010).

Las inundaciones generadas por acción antrópica directa también aumentan en las últimas tres décadas, especialmente entre 2000-2012. El incremento coincide con el aumento de construcciones de canales, obras de riego, centrales hidroeléctricas; obras de relave, sumado a condiciones de mantención y operación inadecuadas. A lo anterior, se suma la falla en infraestructura ocasionada luego del terremoto de 2010 (e.g localidad de Colbún), por el posible debilitamiento de las obras; esta situación no es nueva; el terremoto de 1985 obligó al cierre de operaciones de 26 de 528 embalses por debilitamiento en su estructura (Peña, 1986).

Los efectos geográficos que causan los eventos se relacionan principalmente con el daño en viviendas, que es coincidente con la ocupación en áreas aledañas de cauces (Mardones y Vidal, 2001). En cuanto a las fatalidades que ocurren por evento, se vinculan

principalmente con la rapidez de la crecida, en este contexto resulta fundamental contar con adecuados sistemas de alerta temprana. El ENOS puede ser un buen predictor a largo plazo especialmente desde los 36° S al norte, pues los eventos con mayor número de damnificados (>100.000 personas) en la última década (2000-2009), se producen los años 2000 y 2002, en condiciones neutras y El Niño respectivamente (ONEMI, 2011).

Esta revisión de las inundaciones en Chile, no considera el total de eventos de inundación, pues los más pequeños y zonas con menor cobertura de medios de comunicación generalmente no quedan registrados (Rojas *et al.*, 2010); sin embargo, la validez de la muestra se evidencia en la comparación de frecuencias por tipologías de eventos detonados por precipitación del período 1574-2012, con el comprendido entre 1900-2012. En relación a las investigaciones analizadas, en su mayoría profundizan en tipos de eventos asociados a procesos de precipitaciones en zonas de alta recurrencia histórica; son escasos los estudios en tipologías de inundaciones asociadas a procesos volcánicos, nivales-glaciares e intervenciones antrópicas.

La ocurrencia y alta variabilidad de estos fenómenos en el territorio nacional, es lo suficientemente elevada para considerarla en la planificación y ordenamiento del territorio. El manejo adecuado de las zonas ribereñas y/o terrazas fluviales, ante el incremento de la expansión urbana hacia esas áreas, puede disminuir el impacto de las inundaciones frecuentes. Además la construcción de infraestructuras como grandes hidroeléctricas que potencialmente pueden inundar grandes zonas, deben considerar crecidas centenarias como GLOFs/IDLOFs, deslizamientos cosísmicos, volcanismo y fallas ingenieriles. Solo una evaluación correcta de factores condicionantes y detonantes de procesos de inundación fluvial podrán contribuir en la reducción de los desastres asociados a estos fenómenos considerando la dinámica del Cambio Ambiental Global y los incipientes sistemas de alerta temprana a nivel nacional para estos peligros.

Referencias bibliográficas

ADHIKARI, P.; HONG, Y.; DOUGLAS, K.R.; KIRSCHBAUM, D.B.; GOURLEY, J.;

ADLER, R. & BRAKENRIDGE, G. A digitized global flood inventory (1998–2008): compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, 2010, Vol. 55, N° 2, p. 405-422.

ALHO, P.; RUSSELL, A. J.; CARRIVICK, J.L. & KÄYHKÖ, J. Reconstruction of the largest Holocene jökulhlaup within Jökulsá á Fjöllum, NE Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 2005, Vol. 24, N° 22, p. 2319-2334.

BANASIK, K. & PHAM, N. Modelling of the effects of land use changes on flood hydrograph in a small catchment of the Płaskowicka, southern part of Warsaw, Poland. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 2010, Vol. 42, N° 2, p. 229-240.

BJÖRNSSON, H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, 2002, Vol. 35, p. 255-271.

BOWN, F.; RIVERA, A. & ACUÑA, C. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 2008, Vol. 48, N° 1, p. 43-48.

BRATH, A.; MONTANARI, A. & MORETTI, G. Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 2006, Vol. 324, N° 1-4, p. 141-153.

BREIEN, H.; BLASIO, F.V.; ELVERHØI, A. & HØEG, K. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 2008, Vol. 5, N° 3, p. 271-280.

CAMPOS, H.; DÍAZ, G. y CAMPOS, C. Aportes sedimentarios de los ríos Lluta y San José en la zona costera de la rada de Arica, Chile. *Idesia*, 2007, Vol. 25, N° 2, p. 37-48.

CARRASCO, J. y QUINTANA, J. Descripciones de las condiciones atmosféricas en Chile durante 1997-2000 asociadas a El Niño-La Niña, Oscilación del Sur. En: AVARRIA, S.; CARRASCO, J.; RUTLLANT, J. y YÁÑEZ, E. (editores). *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile*. Valparaíso: CONA, 2004.

CARRASCO, J.; CASASSA, G. & QUINTANA, J. Changes of the 0° C isotherm and the

equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological sciences*, 2005, Vol. 50, N° 6, p. 933-948.

CARRIÓN, D. *Análisis de un posible vaciamiento del lago Greve, Campo de Hielo Sur, en relación con distintos escenarios climáticos*. Santiago de Chile: Memoria para optar al título de Geógrafa. Universidad de Chile, 2010.

CAVIEDES, C. Influencia de ENOS sobre las variaciones interanuales de ciertos ríos en América del Sur. *Bull. Inst. études andines*, 1998, Vol. 27, N° 3, p. 627-641.

CENTRO DE ESTUDIOS CIENTÍFICOS (CECS). *Estrategia nacional de glaciares fundamentales*. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas, 2009.

CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). *Informe Final, Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. Santiago de Chile: CIREN, 2010.

CHU, H.-J.; LIN, Y.-P.; HUANG, C.-W.; HSU, C.-Y. & CHEN, H.-Y. Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. *Hydrological Processes*, 2010, Vol. 24, N° 18, p. 2538-2554.

DI CASTRI, F. y HAJEK, E. *Bioclimatología de Chile*. Santiago de Chile: Universidad Católica de Chile, 1976.

DUARTE, C.; ALONSO, S.; BENITO, G.; DACHS, J. y MONTES, C. *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2006.

DUSSAILLANT, A.; BENITO, G.; BUYTAERT, W.; CARLING, P.; MEIER, C. & ESPINOZA, F. Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards*, 2010, Vol. 54, N° 2, p. 469-481.

EISSA, A.E. & ZAKI, M.M. The impact of global climatic changes on the aquatic environment. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, Vol. 4, p. 251-259.

EM-DAT. *Emergency Events Database Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)*. Lovaina – Bruselas: Université Catholique de Louvain - Ecole de Santé Publique, 2013. Disponible en internet : <http://www.emdat.be>

GONZÁLEZ, P. Perspectiva Geográfica del Riesgo de Inundación en la ciudad de Talca. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1987, N° 30, p. 63-79.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O. *Volcanes de Chile*. Santiago de Chile: Instituto Geográfico Militar, 1995.

HARAMBOUR, S. *Río Las Minas, una personalidad geológicamente inestable*. Magallanes: Universidad de Magallanes, 2012.

HENRÍQUEZ, C. El proceso de urbanización en la cuenca del río Chillán y su capacidad adaptativa ante precipitaciones extremas. *Estudios Geográficos*, 2009, Vol. 70, N° 266, p. 155-179.

HOUSTON, J. Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 2006, Vol. 2198, p. 2181-2198.

HOWARD, D. A.; LUZZADDER-BEACH, S. & BEACH, T. Field evidence and hydraulic modeling of a large Holocene jökulhlaup at Jökulsá á Fjöllum channel, Iceland. *Geomorphology*, 2012, Vol. 147-148, p. 73-85.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). *Censo de Población y vivienda 2012*. Santiago de Chile: INE, 2012.

IPCC. Summary for Policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; MILLER, M. (editors). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, p. 1-18.

KELLER, E. y BLODGETT, R. *Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2007.

KOVACIC, I. Determinación de áreas de riesgos por inundación en la comuna de Vitacura. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1991, N° 34, p. 39-60.

LARA, L.E. The 2008 eruption of the Chaitén Volcano, Chile: a preliminary report. *Andean Geology*, 2009, Vol. 36, N° 1, p. 125-129.

MARDONES, M. y VIDAL, C. La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana. *EURE*, 2001, Vol. 27, N° 81, p. 97-122.

MARIÁNGEL, W. Aplicación al pie de monte de la comuna de La Reina, de un parámetro primordial para la expansión urbana: El Riesgo Físico. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1990, N° 32, p. 51-71.

MASIOKAS, M.H.; VILLALBA, R.; LUCKMAN, B.H.; LASCANO, M.E.; DELGADO, S. & STEPANEK, P. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 2008, Vol. 60, N° 1-2, p. 85-100.

MERZ, B.; HALL, J.; DISSE, M. & SCHUMANN, A. Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2010, Vol. 10, N° 3, p. 509-527.

MONTECINOS, A. & ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 2003, Vol. 16, N° 2, p. 281-296.

MUÑOZ, O. Quebrada de Macul: un factor de desequilibrio físico en la comuna de La Florida. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1990, N° 32, p. 103-134.

NIEMEYER, H. y CERECEDA, P. *Hidrografía. Geografía de Chile. Tomo VIII*. Santiago de Chile: Instituto Geográfico Militar, 1984.

NIRUPAMA, N. & SIMONOVIC, S.P. Increase of Flood Risk due to Urbanization: A Canadian Example. *Natural Hazards*, 2007, Vol. 40, N° 1, p. 25-41.

OFICINA NACIONAL DE EMERGENCIA (ONEMI). *Análisis de impactos por Sistemas Frontales de magnitud*. Santiago de Chile: ONEMI, 2011.

OLANG, L.O. & FÜRST, J. Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya. *Hydrological Processes*, 2011, Vol. 25, N° 1, p. 80-89.

OLLERO, A. Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico. *Lurralde inves. esp.*, 1997, N° 20, p. 261-283.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). Disponible en internet: <http://www.paho.org/chi/>

ORTILEB, L. Eventos El Niño y Episodios Lluvioso en el Desierto de Atacama: El registro de los dos últimos siglos. *Bull. Inst. études andines*, 1995, Vol. 24, N° 3, p. 519-537.

PEÑA, H. *Desastres de origen hidrológico*. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas, 1986.

PEÑA, H. y ESCOBAR, F. *Análisis de una crecida por vaciamiento de una represa glacial*. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas, 1983.

PEÑA, H. y KLOHN, W. Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 1990, Vol. 5, N° 1, p. 21-38.

PIZARRO, J. y CASTILLO, C. *Eventos meteorológicos severos ocurridos en Chile Continental: descripción y patrones sinópicos tipos asociados*. Santiago de Chile: Dirección Meteorológica de Chile, 2006.

QUINTANA, J. & ACEITUNO, P. Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 2012, Vol. 25, N° 3450, p. 1-22.

QUINTANILLA, V. Riesgos que actúan sobre el medio ambiente de la ciudad de Santiago de Chile. *Anales de Geografía de la*

Universidad Complutense, 1995, Vol. 15, p. 559-569.

REBOLLEDO, J. El Impacto de la expansión de la ciudad de Talca en el medio ambiente natural. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 1987, N° 30, p. 63-79.

ROJAS, C. y MARDONES, M. Las Inundaciones en la ciudad de Valdivia. Eventos Históricos 1899-2002. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 2003, N° 34, p. 225-242.

ROJAS, C.; PINO, J.; BASNOU, C. & VIVANCO, M. 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*, 2013, N° 39, p. 93-113.

ROJAS, O.; MARTÍNEZ, C. y JAQUE, E. Recurrencia Histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, región del Bío-Bío. *Tiempo y Espacio*, 2010, Vol. 25, p. 117-135.

ROJAS, O. y MARTÍNEZ, C. Riesgos Naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 2011, Vol. 20, p. 83-116.

ROMERO, H. y MENDONÇA, M. Análisis comparativo de los factores naturales y urbanos de las inundaciones ocurridas en las ciudades costeras de Valparaíso y Florianópolis. *Cuaderno de Investigación Urbanística*, 2009, N° 66, p. 96-107.

SMITH, P. y ROMERO, H. Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2009, N° 43, p. 81-93.

STERN, N.H. *The economics of climate change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

SURIYA, S. & MUDGAL, B.V. Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 412-413, p. 210-219.

TOCKNER, KLEMENT, & LORANG, M. River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts. *River Research and Applications*, 2010, Vol. 26, N° 1, p. 76-86.

URRUTIA DE HAZBÚN, R. y LANZA, C. *Catástrofes en Chile 1541-1992*. Santiago de Chile: La Noria, 1993.

VARGAS, G.; ORTLIEB, L. & RUTLLANT, J. Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista geológica de Chile*, 2000, Vol. 27, N° 2, p. 1-21.

VARGAS, J. y LANGDON, R. *Influencia del sistema de embalses Ralco-Pangué en las crecidas del Biobío*. Santiago de Chile: Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, 2007.

VIDAL, C. y ROMERO, H. Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Biobío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. En: PÉREZ, L. e HIDALGO, R. *Concepción metropolitana (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Santiago de Chile: Serie GEOlibros, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2010.

VUILLE, M. & KEIMIG, F. Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data. *Journal of Climate*, 2004, Vol. 17, N° 17, p. 3334-3348.

WHEATER, H. & EVANS, E. Land use, water management and future flood risk. *Land Use Policy*, 2009, Vol. 26, p. S251-S264.

WORNI, R.; STOFFEL, M.; HUGGEL, C.; VOLZ, C.; CASTELLER, A. & LUCKMAN, B. Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 444-445, p. 134-145.

XIE, Z.; SHANGGUAN, D.; ZHANG, S.; DING, Y. & LIU, S. Index for hazard of Glacier Lake Outburst flood of Lake Merzbacher by satellite-based monitoring of lake area and ice cover. *Global and Planetary Change*, 2013, Vol. 107, p. 229-237.

ARTÍCULOS PUBLICADOS EN REVISTA DE GEOGRAFÍA NORTE GRANDE

Número 57

Editorial: En Memoria del Profesor Jürgen Bahr

- Por: Instituto de Geografía -

Obituario: Jürgen Bahr 31.10.1940 – 26.2.2014

- Por: Instituto de Geografía -

Bogotá, urbanismo posmoderno y la transformación de la ciudad contemporánea

- Por: Jhon Williams Montoya -

Declive urbano, estrategias de revitalización y redes de actores: el peso de las trayectorias locales a través de los casos de estudio de Langreo y Avilés (España)

- Por: José Prada-Trigo -

Naturaleza privada y calidad de vida. Influencia de la naturaleza doméstica en el bienestar de los propietarios de las casas con patio de la ciudad de Córdoba, España

- Por: Carlos Priego González de Canales, Jürgen Breuste y Luis Rodríguez-Morcillo Baena -

Participación popular en la producción del hábitat. El caso del Área Metropolitana de Tucumán-Argentina

- Por: Paula Boldrini y Claudia Gómez López -

Delincuencia y violencia en entornos residenciales de Santiago de Chile

- Por: Ximena Tocornal, Ricardo Tapia y Yuri Carvajal -

Detección del área con desierto florido en el territorio del Mar de Dunas de Atacama, mediante percepción remota

- Por: Consuelo Castro Avaria, Álvaro Montaña Soto, Carlos Pattillo Barrientos y Álvaro Zúñiga Donoso -

El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales

- Por: Pablo Sarricolea Espinoza y Javier Martín-Vide -

Sensoriamento remoto de alta resolução espacial na caracterização de assentamentos informais

- Por: Admilson da Penha Pacheco, Rodrigo Mikosz Goncalves, Eduardo Rodrigues Viana de Lima y Alex Garcia Ximenes Quintans -

Ecología política y represas: elementos para el análisis del Proyecto HidroAysén en la Patagonia chilena

- Por: Hugo Romero Toledo -

Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos

- Por: Octavio Rojas, María Mardones, José Luis Arumí y Mauricio Aguayo Arias -

A methodology for assessing poverty in Moldavia (Romania)

- Por: Daniel Tudora -

Metodología para medir la pobreza en Moldavia (Rumania)

- Por: Daniel Tudora -

Margarita Fernández y Javier Salinas (compiladores), Defensa de los derechos territoriales en Latinoamérica (2012)

- Por: José Carlos Barrio de Pedro -

Graciela Silvestri, El lugar común. Una historia de las figuras de paisaje en el Río de la Plata (2011)

- Por: Andrés Nuñez G. -

4.2.- Capítulo 2. Inundaciones fluviales en la Cuenca del Andalién (1960-2010): tendencias de precipitación extrema y su relación con El Niño Oscilación del Sur.

Rojas, O. & Mardones, M. Inundaciones fluviales en una cuenca costera mediterránea del centro sur de Chile (1960-2010): Tendencias, implicancias y variabilidad de la precipitación asociada con el ENSO. *Manuscrito enviado a revista Physical Geography*

Resumen

Esta investigación aborda la recurrencia y las tendencias de las inundaciones, y su relación con los cambios y la variabilidad de las precipitaciones asociadas a El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y el cambio climático, en una cuenca costera del centro-sur de Chile (36°s), durante el periodo 1960-2010. Se realizó una revisión crítica de los periódicos para recoger datos de inundaciones, que proporcionó importante información sobre eventos de inundación, no registrados instrumentalmente. Posteriormente, la relación ENSO-precipitaciones se determinó mediante Rho de Spearman; y para la relación de ENSO-inundaciones, se utilizó la prueba de Chi-cuadrado. Por último, las tendencias de las precipitaciones extremas se obtuvieron mediante la aplicación de la prueba de Mann-Kendall y Sen Estimador. Para el período 1960-2010, se registraron 21 inundaciones, con una recurrencia promedio de 2,43 años, el 100% durante el invierno austral asociado a episodios de precipitaciones >150 mm. En la serie temporal de inundaciones se identificaron tres periodos: 1960-1974, 1975-1997 y 1998-2010. La magnitud relativa de las inundaciones se incrementó en 26% entre 1960-2010. Acorde con estos resultados se encontró una tendencia creciente de aumento en precipitaciones extremas, consistente con estudios regionales realizados para América del Sur. Respecto al ENSO en su fase cálida no se ha comprobado una relación estadísticamente significativa con la ocurrencia de Inundaciones o precipitaciones altas en el invierno austral en el centro sur de Chile para el período analizado.

Palabras claves: inundaciones fluviales, precipitación extrema, Cambio Climático, ENSO, Río Andalién, Concepción.

Floods in a coastal Mediterranean basin south Central Chile (1960-2010): Trends, implications and rainfall variability associated with ENSO

Octavio Rojas Vilches

Centre of Environmental Sciences EULA-Chile, University of Concepción, Concepción,
Chile.

Corresponding author: ocrojas@udec.cl

María Mardones Flores

Centre of Environmental Sciences EULA-Chile , University of Concepción, Concepción,
Chile.

Abstract: This research addresses recurrence and trends of flooding, changes and variability in rainfall associated to El Niño Southern Oscillation (ENSO) and climate change. The study was conducted using rainfall data during a 50 year period from the Andalién River Basin, Chile (36°S). A critical review of newspapers was made to collect floods data. Subsequently, the relationship ENSO-rainfall was determined by Spearman Rho correlation; and for the relationship ENSO-floods, the chi square test was used. Finally, extreme rainfall trends were obtained by applying the Mann-Kendall test and Sen Estimator. For the period 1960-2010, 21 floods were registered, with a recurrence of 2.43 years, 100% during the austral winter associated with rainfall greater than 150 mm. Three periods were identified in the temporal series of floods: 1960-1974, 1975-1997 and 1998-2010. The relative magnitude of floods increased by 26% between 1960-2010. Extreme rainfall indicated an increasing trend consistent with regional studies carried out for South America. With respect to ENSO, in its warm phase we did not confirm a statistically significant relationship with the occurrence of floods or high precipitation during the Austral winter in south Central Chile.

Key words flood hazard; rainfall trends; rainfall variability; climate change; ENSO; Andalién River.

Introduction

Floods are a natural process by which the river exceeds the limits of its channel (Tockner et al., 2010), and their dangerousness depends on natural and anthropogenic factors (Gemmer et al., 2008). Disasters associated with such events cause death, loss of infrastructure and deterioration of both quality and standard of living (Huang et al., 2008; Arman et al., 2010; Rahman & Nawaz 2011; Fu et al., 2013). In the period of 1998-2008 more than 2900 flood events were registered in the world (Adhikari et al., 2010). It is assumed that the high number of events in the last decade is associated with climate change due to increases in rainfall frequency and intensity that may accompany acceleration in the hydrological cycle, altering both frequency and magnitude of flooding (Duarte et al., 2006; Gilroy & McCuen 2012; Lim et al., 2012). However, on a global scale, there exists a low confidence level with regards the trends in the magnitude and/or frequency of floods (IPCC, 2013).

There is an interest to assess changes under extreme hydroclimatic conditions, due to climate variability or climate change in Mediterranean areas (Cortesi et al., 2012; Pizarro et al., 2012; Sarricolea et al., 2014; Skansi et al., 2013; Donat et al., 2013). These are the areas that are most susceptible to climate change, due to their status as a transition zone between arid and humid climatic zones (Chaouche et al., 2010). In southern Europe, in the Mediterranean Basin, there exists reports of both increase and decrease in heavy precipitation trends (Cortesi et al., 2012). On the American Continent, Donat et al., (2013) and Skansi et al., (2013) reported positive tendencies for extreme precipitation indices for the eastern half of North and South America, including the Chilean Mediterranean Coastal Zone.

For the Chilean Mediterranean climate zone (32°-38° S), annual precipitations gradually increase from north to south from 400-2000 mm (Rojas et al., 2014; Montecinos & Aceituno, 2003). In this zone, there is a prevalence of a negative tendency in annual precipitation during the 20th Century (DGA, 1999; Carrasco et al., 2005; Quintana & Aceituno, 2012). Around 75% of rainfall is concentrated in the austral winter (June, July, August), with intense rainfall events in 24-h (Rutllant, 2004; Pizarro et al., 2012), and its genesis is associated with the northward migration of extratropical cold fronts (Quintana & Aceituno, 2012).

The interannual variability and trends in the rainfall regime, en chile central, are controlled by a series of independent factors: El Niño Southern Oscillation (ENSO), the Pacific Decadal Oscillation (PDO), the southeast Pacific subtropical anticyclone (SEP-High), Antarctic Oscillation (AAO) (Quintana & Aceituno, 2012). For example, Sarricolea et al., (2014) links the decreasing rainfall are explained by a significant intensifying of the SEP-high, with a negative phase of ENSO (La Niña) and a cold phase of PDO. On the contrary, the weakening of the SEP-high, a positive phase of ENSO (El Niño) and a warm phase of PDO, according to their research, leads to an increase in rainfall.

ENSO can control a third of the rainfall variability in central Chile. In its warm phase, (El Niño), rainfall can reach more than 100% of the annual total in a normal year (Rutllant, 2004). This is because the number of days and intensity of daily rainfall increases, as evidenced in the northern Chilean Mediterranean zone (32°S) in 1972, 1982, 1984, 1987 and 1997, (Montecinos & Aceituno, 2003; Carrasco & Quintana, 2004; Rutllant, 2004). The interannual concentration and variability of the precipitation results in a high recurrence of floods, with a return period (T) of ≈ 20 years for a major floods (Alarcón, 1995; Rojas et al., 2010).

The Andalién River basin is located on the southwest extreme of the Chilean Mediterranean zone (36°S). Its lower section experiences a densification and urban expansion process, with a current population of 90,000 inhabitants, located in 9.4 km². In this sector during the last decade, floods have been frequent, with five major events occurring in 2000, 2001, 2002, 2005 and 2006. This means a high cost for the Chilean Government. For example the cost of the 2005 disaster in the region amounted to US\$ 6.5 million, according to the Regional Emergency Office (OREMI) (Mardones et al., 2004). This research proposes that the most frequent and magnitude of river floods on the lower side of the Andalién river basin in the last 50 years could be related to more intense daily rainfall events linked to climate change and variability associated with ENSO.

This research attempts to solve the following questions: (1) what is the variability of both frequency and magnitude of floods in the Andalién river basin? (2) What relation do have floods events with rainfall associated with ENSO and extreme precipitation trends associated with climate change?, and (3) What is the response on a local scale to hydroclimatic changes registered on a regional scale? Therefore, for the period 1960-2010 historical recurrence and flood trends are analysed, as well as signs of change in the precipitation extremes and the correlation of events of rainfall and floods with ENSO phases. The results from a time period of 50 years, establish a trend in the flood events which can be linked to climate change and the role of the climate variability associated with ENSO.

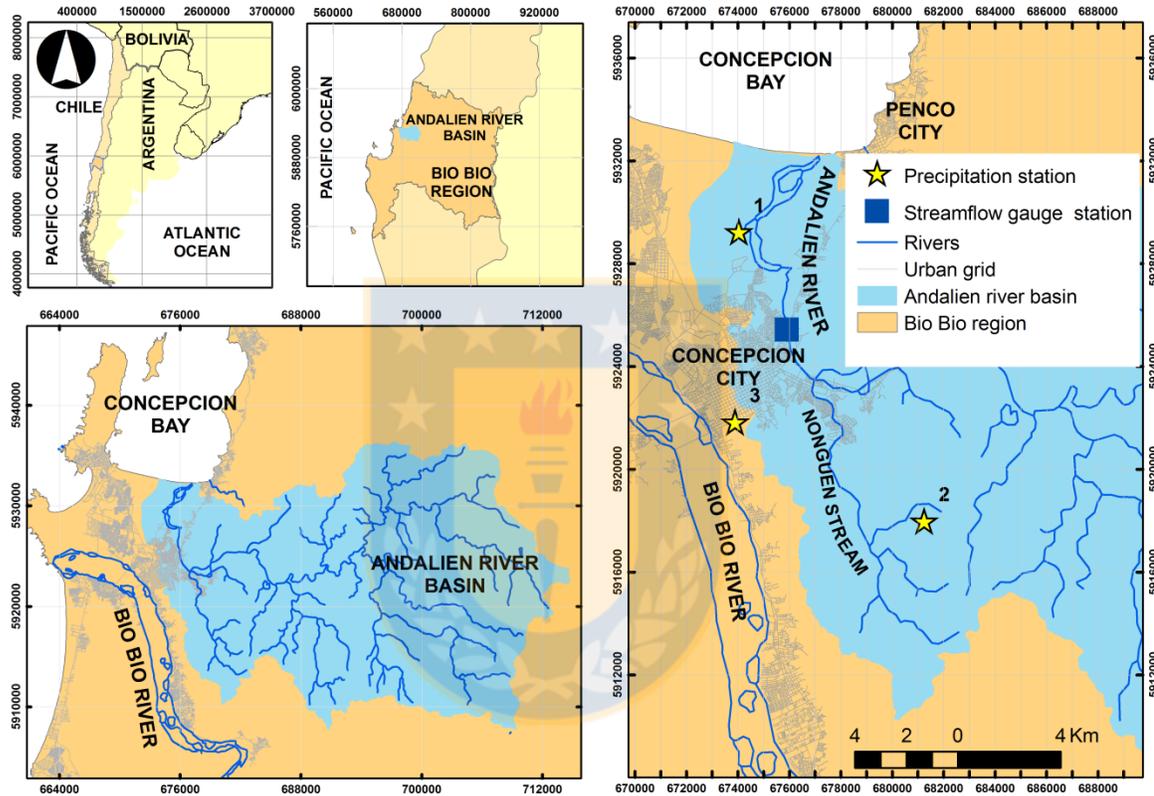
Materials and methods

Study area

The Andalién river basin (715 km²) is located on the western margin of the Cordillera de la Costa (36°44' S, 73°01' W), Bío-Bío, Chile. The city of Concepción is located in the lower section of this basin (Figure 2.1). An estimated 90,000 inhabitants are concentrated in approximately 4% of the catchment area, with a density of 15,000 inhabitants/km². This area has a poverty rate of 16.5% (Jaque, 2010), and rapid urban growth has increased the exposure to natural hazards, particularly to the risk of flooding (Alarcón, 1995; Mardones & Vidal, 2001).

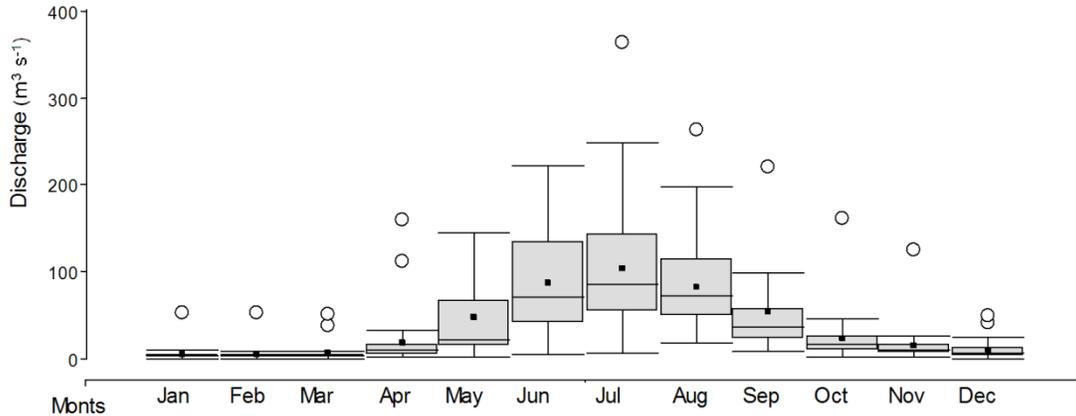
Forestry is the main land use in the basin (55%) with species such as *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*. Other land uses include: native forest (10%), agricultural (8.1%) and urban activities (3%) (Hernández, 1999). In the 1990s 18% of the medium and upper sections of the basin surface were degraded by erosion in gully and rill (Jaque, 1996). The Chilean Forestry Commission (CONAF, 2008) calculated an increment of 36% of the eroded surface of the basin for the period 1992-2008.

Fig. 2.1 Location of the study area, with the position of meteorological stations. (1) Carriel Sur, (2) Nonguén, and (3) Caracol.



The climate of the study region is temperate-Mediterranean, with a dry austral summer (December, January, February) and rainy austral winter (June, July, August). Annual rainfall in the basin varies from 1200-1600 mm (Devynck, 1970). There are usual episodes of five days of continuous rainfall in winter, with peak values reaching 124 mm/24-h in June 1974 and June 2006 (Peña et al., 1993; Mardones et al., 2004). In the lower section, the average annual discharge can measure $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. The concentration time is 12-h and daily maximums vary greatly in winter, having destructive phases particularly in the months of June and July (Figure 2.2). During floods with $T=50$ and $T=100$ years, maximum instantaneous peak discharges of $494 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and $612 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ are expected, with a drag of solids of $0.68 G_s \text{ kg/m}^3$ and $0.47 G_s \text{ kg/m}^3$, respectively (EIC Ingenieros Consultores, 2008).

Fig. 2.2 Boxplots of maximum daily average discharge in the lower section of Andalién River, 1961-2011 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Horizontal line and square inside the box indicate median and mean. Lower and upper ends of the box correspond to the quantile 0.25 and 0.75. Lower whisker and upper whisker are 0.05 and 0.95, respectively. Circles correspond to atypical values. Data source: Chilean General Water Directorate, (*Dirección General de Aguas- DGA*).



Data sources and trends index

Flood records were obtained from the local newspaper, “El Sur”, through a review of daily news for the period 1960-2010. Proxy data from newspapers was used, given that streamflow gauge in the basin presented incomplete or underestimated data during floods. Newspapers contain valuable information on contemporary floods, which by means of a critical review; can be used to extract environmental flood information (Barriendedos et al., 2003; Brázdil et al., 2006). A database was used that contained specific features of the flooding (dates, duration, depth and duration), as well as direct tangible and intangible damages (affected neighbourhoods, infrastructure damage and deceased). The obtained information was transformed into semi-quantitative data by applying an index of relative magnitude.

Relative magnitude was constructed according to the damage and features of the events. This classification combines criteria of systematic analysis for historical floods used in Spain, France, Germany and Chile (Barriendedos et al., 2003; Glaser & Stangl, 2003; Mudelsee et al., 2004; Brázdil et al., 2005; Rojas et al., 2010). Five criteria are proposed to determine the relative magnitude of each event: deceased; neighbours affected; water depth in buildings (ΔH); damage in infrastructure and flood duration. Each criteria was divided into three categories according to the relative level of damage: small flood (1 point), moderate flood (2 points) and damaging flood (3 points). Given that for each event, not all criteria was present, for the final evaluation, the four greater magnitude criteria were taken into account. For example, a flood that obtained a score of three in four criteria summed a total of 12 points. According to its final score, each event was categorized as small (4-6 points), moderate (7-9 points) and damaging floods (10-12 points) (Table 2.1).

Table 2.1 Relative magnitude of river floods

Criteria	Magnitude		
	Large	Moderate	Small
Deceased	≥2	=1	Absents
Neighbors affected	≥5	3-4	1-2
Water depth in buildings (ΔH)	≥1 m	1 < ΔH ≤ 0.5 m	0.5 < ΔH ≥ 0.1 m
Damage in infrastructure	Housing, roads, routes, infrastructure, Basic services	Housing, roads	roads
Duration	≥ 3 days	2 days	1 day

Source: adapted from Barriendos et al., (2003); Glaser & Stangl, (2003); Mudelsee et al., (2004); Brázdil et al., (2005); Rojas et al., (2010).

Relative magnitude data were subjected to cross-validation through contrast with discharge (2000-2010) and rainfall (1969-2006) according to the quality and availability of the station data. Discharge and limnigraph height was obtained from Andalién Camino a Penco Station (DGA- General Water Directorate) (Figure 1). In validation, indicators of rainfall data were used at 24-h, 48-h and 72-h (R24; R48; R72); 1, 4 and 8 weeks prior to the event (1W; 4W; 8W) and rainfall of the event with an independence criterion of 48-h without rainfall (Re). Once the data were validated, Pettitt's test (1979) used to determine the points of significant change in the time series. Additionally, the recurrence interval was obtained (Keller & Blodgett, 2007), using the expression:

$$R = \frac{N+1}{M}$$

Where: R corresponds to the recurrence interval in years, N is the number of years of registration and M is the degree of individual magnitude in registered years

Three rainfall stations were used for the statistical analysis of trends and definition of indices (Figure 1, Table 2.2). Data were obtained from the Chilean Meteorological Directorate (DMC). Among the stations, only Carriel Sur had a continuous series of daily data. Nonguén and Caracol stations had missing data at annual, seasonal and monthly scales. These were filled through linear regression.

Finally, after the complete series of data was constructed, los they were submitted to analysis, searching for obvious discrepancies of values at nearby stations. Homogeneity of the time series was tested by applying by two methods: double mass curves and the statistical normal standard homogeneity statistical SNHT test (Alexandersson, 1986). Double mass curves provided coefficients R2=0.999 in all periods analysed, an excellent fit was indicated. SHNT showed that rainfall data were homogeneous between 1960-2010.

Table 2.2 Stations rainfall record used for statistical analysis of trends and definition of indices

N°	Station Name	Elevation (m)	Latitude	Longitude	Periods of available records	Periods of used records
1	Carriel Sur	12	36° 46' S	73° 03' W	1968-2010	1968-2010
2	Nonguén	145	36° 52' S	72° 58' W	1920-2010	1961-2010
3	Caracol	100	36° 50' S	73° 03' W	1927-2010	1960-2010

Notes: N° indica número de localización en la Fig. 1. Data source: ChileanDMC.

Once the series were achieved and validated, maximum rainfall in 24-h was obtained, as well as the trends of several indices associated with extreme rainfall (Table 3). Maximum rainfall in 24-h on a monthly scale was calculated at the Carriel Sur station associated to different return rates (T). Five probability distributions were used: Gamma, LogNormal III parameters, LogNormal, LogPearson and Gumbel. The best statistical adjustment of monthly distribution was selected using the Kolmogorov-Smirnov test, with a confidence level of 95%.

Evaluation of rainfall trends associated to the generation of floods was performed by the application of 13 indices, systematized in Table 2.3. The proposal of the Expert Team Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) was taken as reference. These have been applied on a global scale by Donat et al, (2013) and for South America by Skansi et al., (2013). Also, given that flooding is associated with concentrated precipitations, the Rainfall Concentration Index (Oliver, 1980) was used, which is an indicator of precipitation seasonal behaviour and aggressiveness:

$$PCI = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} P_i\right)^2}$$

Where P_i corresponds to the monthly rainfall of month i . According to the classification by Oliver (1980): $PCI < 10$ indicates uniform precipitation distribution (low concentration); $PCI > 11$ and < 15 indicates moderate concentration; $PCI > 16$ and < 20 indicates irregular distribution (medium-high concentration); $PCI > 20$ indicates a strong irregularity (high concentration).

Statistical analysis

The correlation between ENSO-rainfall was analysed by means of the Spearman's Rho test (Dietz et al., 2006; Lim et al., 2012). Data from ENSO events was obtained through the Oceanic Niño Index (ONI) that uses the anomaly of sea surface temperature of El Niño region 3.4. These data are available from 1950 to date at the Climate Prediction Center (NOAA). ONI values and the quarterly rainfall standardized were correlated from 1968 for the Carriel Sur, the only station that provided monthly data. Each quarter

is indicated with the letter of the respective months (e.g. MJJ for May, June and July). In order to determine the relation between ENSO-floods, Chi-Square test was used (χ^2). ENSO phases were categorized as positive anomalies (El Niño), negative anomalies (La Niña) and neutrals, according to ONI index versus the occurrence of floods or normal years (without floods) (Yin et al., 2009). For both tests, a level of confidence of 95% was used.

Trend analysis on the indices associated to climate change (Table 3) was performed by means of the Mann-Kendall non-parametric test (Mann, 1945; Kendall, 1975), which identifies significant trends, either increasing or decreasing. This test has been extensively used in studies on precipitation, temperature and discharge (Batisani & Yarnal, 2010; Chaouche et al., 2010; Arnone et al., 2013). In the Mann-Kendall test, the presence of statistically significant trends in indices of rainfall was assessed by the value Z . A positive trend in Z indicates a rise in rainfall index, whereas negative trends indicate a decrease in rainfall index. In order to test the significance level, the two tail test for these four levels was used: $\alpha = 0.1, 0.05, 0.01$ and 0.001 . H_0 was rejected if the absolute value of Z was higher than $Z_{1-\alpha/2}$ obtained from the accumulated standard distribution tables. The evaluation of the slope (linear trend Q) was determined by means of the Sen's non-parametric method, which calculates the slope efficiently and is robust to the effect of outliers in the series (Sen, 1968). Results are expressed in mm/decade.

Table 2.3 Indices associated to generation of floods

Index name	Indices definitions	Unit
RInv	Winter rainfall from May to August	mm
Rmm	Maximum monthly rainfall	mm
Rx1day	Maximum rainfall in 24-h	mm
Rx2day	Maximum rainfall in 48-h	mm
Rx3day	Maximum rainfall in 72-h	mm
Remax	Maximum rainfall per event, using an independence criterion of 24 h without rainfall	mm
R _{90p}	Rainfall percentile 90	mm
R _{95p}	Rainfall percentile 95	mm
R _{99p}	Rainfall percentile 99	mm
R10	Number of days with rainfall ≥ 10 mm	Days
R20	Number of days with rainfall ≥ 20 mm	Days
R30	Number of days with rainfall ≥ 30 mm	Days
PCI	Rainfall concentration index (PCI)	%

Results

Flooding 1960-2010.

An extensive review of “El Sur” newspaper in the period 1960-2010 allowed the identification of 21 flood events (Table 2.4). Duration of the events ranged between 1 and 4 days. The recurrence interval of the floods was of $R=2.43$ years, attributed to overflows of the main water course of the basin and to its main tributary, Nonguén creek (Figure 2.1). The seasonal distribution indicated that 95.2% took place during austral winter (June, July, August) and 4.8% at the end of austral autumn (March, April, May); 86% occurred during June and July and only 14% took place during August.

Table 2.4 Historical floods registered in the lower section of the Andalién River basin, 1960-2010

Year	Month	MR	ENSO	R24	R48	R72	1W	4W	Re
1960	June	Medium	Neutral	-	-	-	-	-	-
1961	July	Medium	Neutral	-	-	-	-	-	-
1963	August	Small	Positive	-	-	-	-	-	-
1965	July	Small	Positive	-	-	-	-	-	-
1965	August	Medium	Positive	-	-	-	-	-	-
1969	June	Medium	Positive	35.8	37.1	146.3	184.1	381.1	184.1
1974	June	Large	Negative	115.2	154.9	191.7	223.5	426.3	206.3
1975	July	Small	Negative	39.6	105.3	110.3	110.7	384.3	110.3
1980	July	Small	Neutral	34.0	87.1	110.3	133.4	318	87.1
1984	July	Small	Neutral	20.4	61.8	82.4	148.5	295.9	204.7
1987	July	Small	Positive	42.9	128.6	146.3	216.7	229.5	216.7
1988	July	Medium	Negative	24.3	148.7	178.9	178.9	282.9	178.9
1989	June	Small	Neutral	28.2	56	72.1	134.1	273.7	134.1
1992	May	Small	Positive	35.0	139.4	185.7	222.1	283.1	185.7
1997	June	Small	Positive	12.5	52.6	69.9	138.6	393.9	272.5
2000	June	Medium	Negative	73.6	95.6	109.6	184.4	494.9	209.4
2001	June	Medium	Neutral	36.0	97.8	108.6	110.4	453.1	110.4
2001	July	Small	Neutral	29.9	60.9	75	91.5	249.6	60.9
2002	August	Large	Positive	19.2	115.0	151.4	163.4	242.9	158
2005	June	Medium	Neutral	162.4	162.8	164.4	190.8	399.6	190.8
2006	July	Large	Neutral	58	164.6	184.2	235.6	366.2	235.6

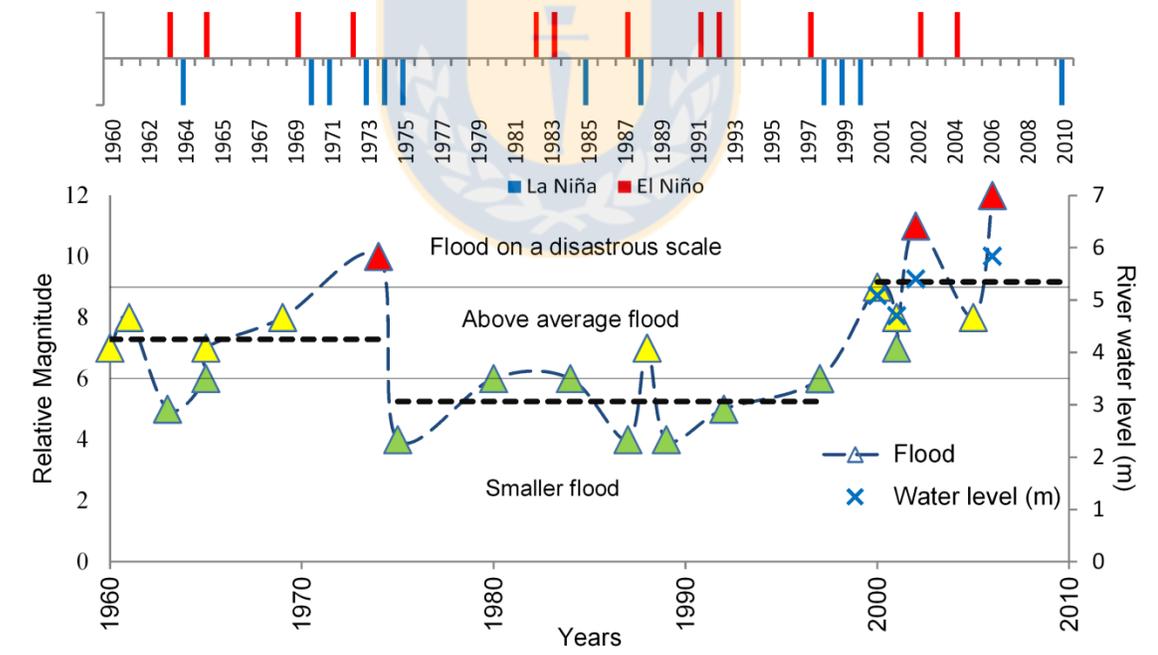
Notes: MR relative magnitude, rainfall of 24 (R24), 48 (R48), 72 (R72) hours; 1 (1W), 4 (4W), 8 (W) weeks previous to the event; and rainfall of the event (Re) with an independence criterion of 48-h without rainfall. ENSO: Positive phase ENSO (El Niño), Negative phase (La Niña). Años en negrita corresponden a damaging floods.

Relative magnitude. Ten events corresponded to small floods ($R=5.1$ years), 8 to moderate floods ($R=6.4$ years) and 3 to damaging floods ($R=17$ years), associated to a probability of annual occurrence of 20%, 16% and 5%, respectively. Floods of damaging magnitude were produced in 1974 (magnitude 10), 2002 (magnitude 11) and 2006 (magnitude 12). In June 1974, precipitation was 191.7 mm/72-h. In August 2002, rainfall reached 151 mm/72-h; the flow gaging station recorded a discharge of $351 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ with a height of 5.4 m. The most damaging flood in the period was registered in July 2006. Flooding was triggered by an intense rainfall event that concentrated 184 mm/72-

h, and the river reached a historical height of 5.84 m and maximum discharge of 572 m³ s⁻¹ (Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2012).

Temporary distribution. Of the flooding events, 80% of the floods occurred during the 1960s, 1980s and 2000s, whereas in the 1970s and 1990s, only 20% of the events were concentrated. Relative magnitude incremented by 26% from 1960-2010. Three cycles were observed through the application of Pettitt's test (Figure 2.3). The first period from 1960-1974, with a moderate relative magnitude of floods (7.3) that affected an average of 2.4 neighbourhoods. Only one flood was registered during this time of damaging magnitude. The next cycle began in 1975 and ended in 1997, characterized by little variation in the magnitude of the events, and affected only 1.4 neighbourhoods, and this period showed small magnitude floods (5.5). The third cycle corresponded to the period of 1998-2010, which presented a high recurrence of floods of high magnitude (9.2) affecting 4.6 neighbourhoods. This last period concentrated 66% of the large magnitude events during the last 50 years.

Fig. 2.3 Trends of river floods in the lower section of the basin and the ENSO variability during austral winter. Dotted horizontal lines indicate the means of the three cycles, corresponding to the 1974 and 1997 shift point, determined by Pettitt's test. Horizontal lines indicate levels of relative magnitude. Green triangles correspond to small floods, yellow triangles, to moderate floods; and red triangles correspond to large magnitude floods. Black crosses represent the water height (m) registered at the flow gauging station located at the lower section of Andalién River.



Floods and ENSO

The relation between flooding-ENSO for the studied period is weak. Some 38% of the floods took place during El Niño years (Positive phase), whereas 19% occurred during La Niña (Negative phase) and 42% were developed during neutral years (Table 2.4; Figure 2.3). From 1960-2010, 5 large magnitude El Niño events were registered worldwide: 1972-1973/ 1982-1983/ 1987-1988 / 1991-1992 / 1997-1998 (Figure 2.4-b). During this period, only three floods were registered, and were of small magnitude. Damaging floods that occurred in 1974, 2002 and 2006 the phases La Niña weak, El Niño moderate and neutral, respectively.

Between 1968-2010, eight rainfall nuclei were detected with thresholds of ≥ 360 mm per month; all of them with occurrence periods in the Austral winter. Similarly, the same seasonal temporary amounts of ≥ 240 mm were shown. This distribution is coherent with the behaviour of the flow in the basin. In summer, winter and spring seasons, the registered amounts fluctuated between 0-180 mm (Figure 2.4-a). The analysis of positive quarterly rainfall standardized indicated that this was produced more frequently from August to November and in secondly, between December and February (Figure 2.4-c).

Regarding standardized rainfall-ENSO (Figure 2.4-b, 2.4-c), the correlation indicated that winter rainfall (May, June and July) was not significantly related to ENSO ($p > 0.05$). On the other hand, continuous and significant relations were produced from the quarter August- October (ASO) to November-January (NDJ) ($p=0.01$). The relation becomes stronger when comparing the same quarter of the ONI index and rainfall standardized.

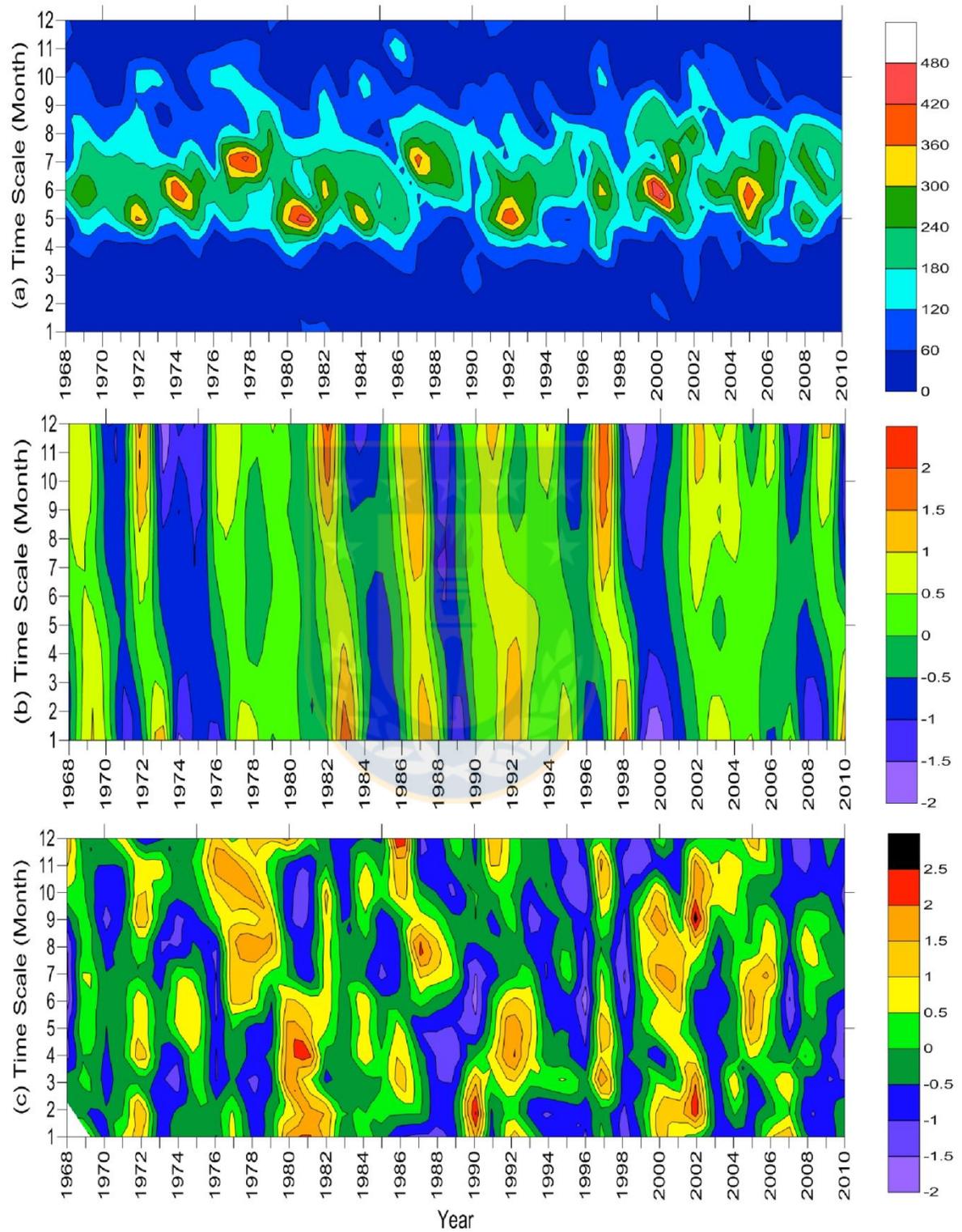
In relation to the ENSO phase and floods of the historical record, the three events that have occurred in August have been produced under El Niño conditions. In general it was observed that there is no statistically significant differences under a confidence level of 95% between the proportions of years with positive anomalies (El Niño), negative (La Niña) or neutral, and the occurrence of floods in the basin ($X^2=3.463$ G.L. 2, $P=0.177$). Floods in the lower section of the basin took place almost with the same frequency during the different phases of ENSO in El Niño region 3.4 (Table 2.5).

Table 2.5 Chi-Square test (χ^2), between flood/normal years in the Andalién river basin and Niño 3.4 ONI index (Austral winter AMJ to ASO) 1960-2010

		Flood	Normal	Total
Niño 3.4 Index	Positive anomaly	7 (4.5)	5 (7.5)	12
	Negative anomaly	4 (4.5)	8 (7.5)	12
	Neutral	8 (10.1)	19 (16.9)	27
	Total	19	32	51

Note: Normal year refer to a year without any flood. Numbers in parenthesis are expected frequencies. Only one flood per year is considered.

Fig. 2.4 Rainfall behavior 1968–2010: a) monthly rainfall in Carriel Sur station; b) ONI index EI Niño region 3.4 c) rainfall standardized in Carriel Sur station (e.g. DJF, 2 JFM, etc.)



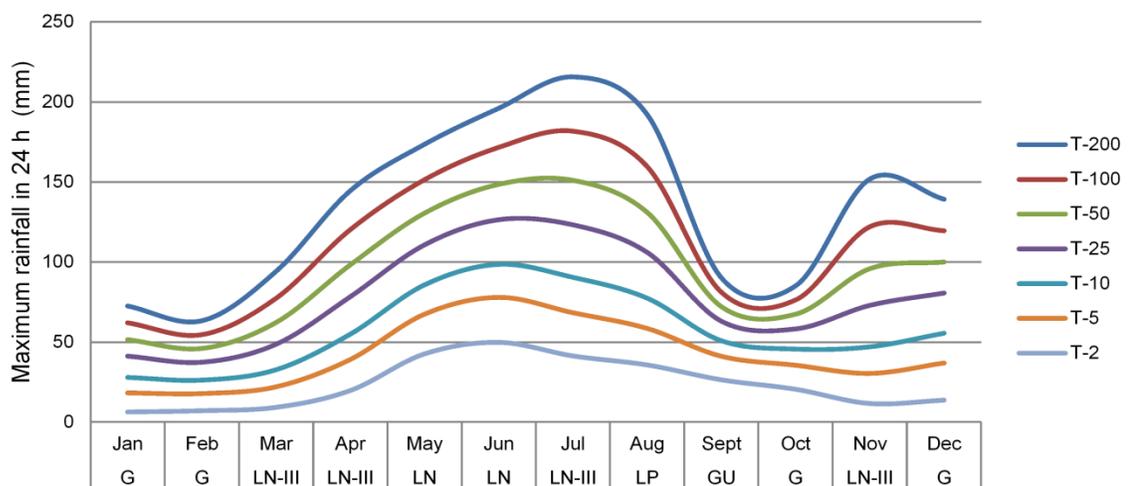
Rainfall extreme, indices and trend estimation

Annual rainfall averages corresponded to 1093 mm, with significant variability expressed in minimum of 598 mm during dry years and maximum of 1560 mm in wet years. Winter contributes to 70% of the annual precipitation, whereas in the wettest month can provide 28%. On average, nine days per year, rainfall exceeds 30 mm (R30).

For rainfall behaviour during flooding event, results indicated that in 69% of the cases, the rainfall associated with flooding was ≥ 150 mm (Table 2.4). The amounts were even more concentrated in moderate and large floods, with thresholds that exceeded 100 mm in 72-h. In both types of events, the previous rainfall of the 4W was ≈ 350 mm. The rate of return of the maximum rainfall in 24-h showed two annual peaks; one of greater magnitude in austral winter, and another in austral spring (September, October, November) (Figure 2.5). The winter rainfall amounts in 24-h were coincident with the historical records of floods. In July, events that exceeded 150 mm occurred for a $T \geq 50$ years, though during this month, rainfall can reach 215 mm in 24-h, with a $T \geq 200$ years. May, June and August registered on average 5% less of maximum rainfall associated with each period of return compared to July.

After the maximum winter rainfall, a second maximum was produced between November and December. In these months, amounts over 120 mm/24-h for $T = 100$ can be registered. High rainfall amounts of these months are associated with warm ENSO. However, in spite of intense daily rainfall, no floods were generated (Table 2.4). This is probably because soil was not saturated, and channels were at low levels (Bravo, 2005).

Fig. 2.5 Maximum rainfall in 24-h for different return periods (T) in Concepción. Probability distributions are indicated for each month: (G) Gamma; (LN-III) LogNormal III parameters; (LN) LogNormal; (LP) LogPearson; (GU) Gumbel. Months are indicated shortcuts.



Trend analysis of climate indices using the Mann-Kendall test showed the absence of statistically significant trends of increase or decrease in amounts and/or days of extreme, seasonal and annual rainfall (Table 2.6). However, trends were found such as a decrease of the annual rainfall (Rannual) in -9.38 mm/decade. At winter level (RInv), data showed that Carriel Sur and Caracol stations presented increasing trends, and Nonguén station tended to decrease. Maximum monthly annual rainfall (Rmm) registered a similar behaviour.

Table 2.6 Statistical analysis of the pluviometric indices

Index	Min	Max	Mean	Std. Desv. (SD)	CV	Skewness	Kurtosis	Mann–Kendall Z	Sen's slope Q
Rannual	598	1560	1093.5	247.8	22.7	-0.06	-0.97	-0.31	-0.938
RInv (1)	351	1129	766.2	196.7	25.7	-0.32	-0.85	0.04	0.115
RInv (2)	343	1070	725.8	189.5	26.1	-0.16	-0.79	1.15	2.523
RInv (3)	376	1482	944.9	253.8	26.9	-0.16	-0.26	-0.27	-0.575
Rmm (1)	134	565	308.6	102.8	33.3	0.61	-0.27	-0.19	-0.324
Rmm (2)	127	515	283.1	93.6	33.1	0.70	-0.03	1.02	0.892
Rmm (3)	176	624	371.1	118.7	31.9	0.34	-0.73	-0.16	-0.213
RX1day (1)	32	162	79.8	31.9	39.9	0.95	0.57	0.66	0.280
RX1day (2)	24	146	66.4	25.6	38.5	1.21	1.66	2.02*	0.445
RX2day	48	187	106.9	36.1	33.8	0.61	-0.46	1.32	0.518
RX3day	53	214	124.3	38.7	31.1	0.55	-0.50	0.78	0.457
Remax	72	379	192.9	65.7	34.1	0.45	0.20	0.03	0.038
P ₉₀	15	35	28.6	4.7	16.7	-0.49	-0.11	0.54	0.045
P ₉₅	24	57	38.7	7.3	18.9	0.44	0.05	1.67*	0.148
P ₉₉	32	127	65.7	21.2	32.3	1.33	1.90	0.45	0.103
R10	24	53	35.4	7.6	21.5	0.29	-0.74	-0.92	-0.091
R20	7	28	17.6	4.7	26.8	-0.05	-0.20	-0.03	0.000
R30	1	15	9.3	3.4	36.2	-0.18	-0.44	0.63	0.024
PCI	11	27	17.4	3.1	17.6	0.89	1.61	0.96	0.044

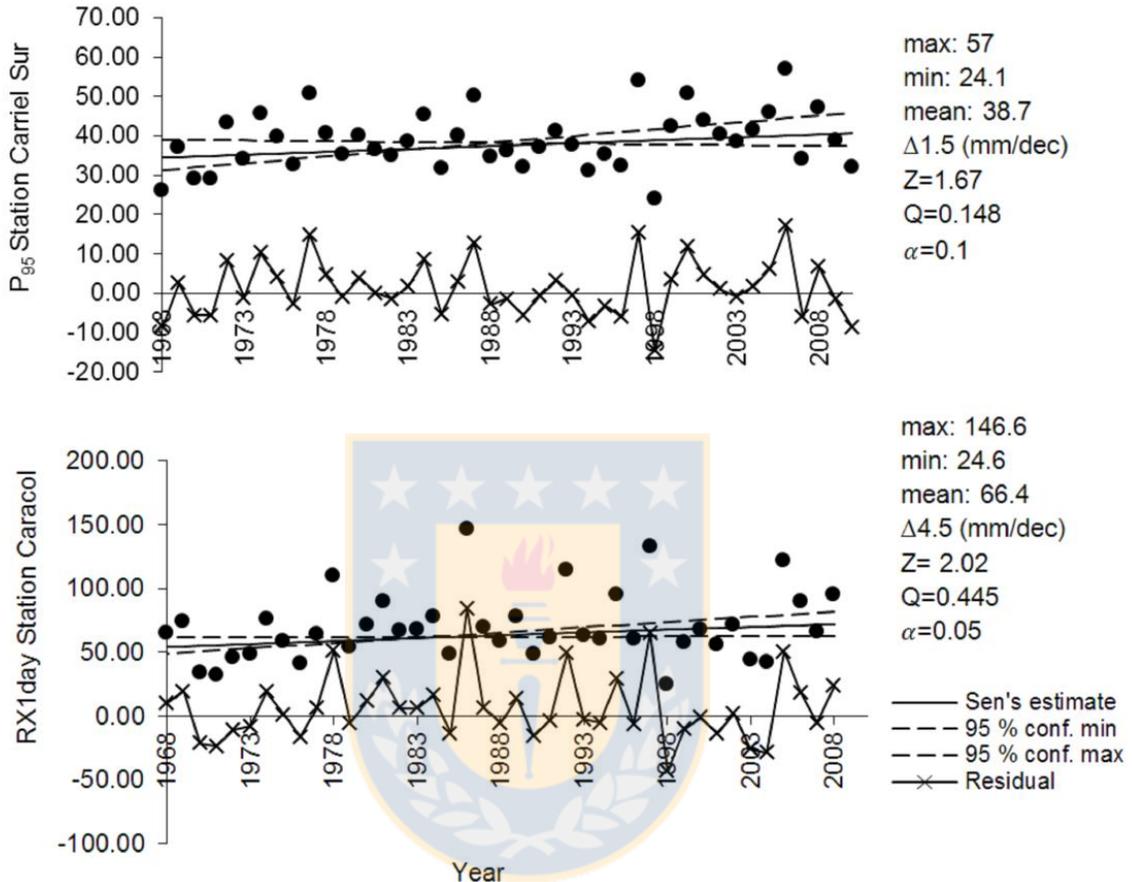
Notes: Significance levels $\alpha = 0.05$ and 0.1 ; (1) Carriel sur (2) Caracol (3) Nonguen. standard deviation (SD), variation coefficient (CV)

Indices for concentration Rx1day, Rx2day and Rx3day showed positive rainfall trends in 3.6, 5.2 and 4.6 mm/decade, respectively. Only Rx1day from Caracol station presented a statistically significant trend with a level $\alpha = 0.05$ ($Z = 2.02$, $Q = 0.445$). Analysis of precipitation percentiles evidenced a similar behaviour. The trend in percentiles R_{95p} and R_{99p} corresponded to an increase of 1.5 and 1.0 mm/decade. In R_{95p} , the trend was significant with a level $\alpha = 0.01$ ($Z = 1.67$, $Q = 0.148$). In contrast, a negative trend was observed in the increment of days in which rainfall exceeds 10 mm (R10) and 20 mm (R20). For days of greater intensity (R30), a small upward trend in 0.24 days/decade was seen.

The Index of rainfall concentration (PCI) classified the rain from low concentration to high concentration and strong irregularity, with a minimum and maximum of 11.7 and 22.7 respectively. The average for the period was 17.4, value that expressed the irregular distribution and a medium-high concentration of the rainfall pattern. PCI index trends showed a higher concentration of 0.44 units/decade, though not statistically

significant. In Figure 2.6, the trends for the calculated statistically significant indices are presented: In all indices, residues were randomly distributed, reflecting random distribution data.

Fig. 2.6 Trends of statistically significant indices R_{95p} and R_{x1day}



Note: Abbreviations in the figure indicate: Maximum (max), minimum (min), mm per decade (mm/dec). Q Sen's slope (per year variation).

Table 2.8 compares the percent variations of the mean of some of the rainfall indices, from the flooding cycles identified in Figure 2.3. A pattern was observed for the increase in rainfall Indices between 8.4-16.4% in the periods 1960-1974 and 1975-1997 (var-1). Between the periods 1975-1997 and 1998-2010 (var-2), the variation was negative between 3.2-10% in the R_{Inv} , R_{mm} , R_{max} and R_{annual} indices, while the maximum indices rainfall R_{x1day} , R_{x2day} and R_{x3day} increased between 0.8-5.1%. The variation in the most extreme periods of the series 1960-1974 and 1998-2010 (var-3), the indices showed general increase between 2.8-29.3%. R_{x1day} , R_{x2day} , and R_{x3day} showed an increment in all the periods analysed. This could be associated with the increase in the relative magnitude of the floods in 26%.

Table 2.7 Comparison of mean rainfall indices selected for the periods 1960-1974, 1975-1997 and 1998-2010

	1960-1974	1975-1997	Var-1 (%)	1998-2010	Var-2 (%)	Var-3 (%)
Number flow events	7	8	14.3	6	-25.0	-14.2
Number of damaging floods	1	0		2		
Relativemagnitudefloods	7.3	5.5	-24.7	9.2	67.3	26.02
RInv	685,4	773,3	12.8	748,4	-3.2	9.2
Rmm	284,0	310,2	9.2	291,9	-5.9	2.8
RX1day	72,3	82,1	13.5	82,8	0.8	14.3
RX2day	97,6	107,7	10.4	112,1	4.1	14.8
RX3day	116,1	125,9	8.4	132,3	5.1	14.0
Remax	171,4	199,7	16.4	179,6	-10.0	4.8
R30	8,4	9,3	10.3	10,9	17.2	29.3

Notes: Var-1 (percentage change period 1960-1974 to 1975-1997); Var-2 (percentage change period 1975-1997 to 1998-2010); Var-3 (percentage change period 1960-1974 to 1998-2010)

Discussion

Historical records provide direct information about the impact of floods associated with the external behaviour of climate (Glaser & Stangl, 2003). The analysis showed a high historical recurrence of floods in the lower section of the Andalién River basin, with a recurrence of 2.43 years. The rates of return per relative magnitude are similar to those obtained by Alarcón (1995), who determined that moderate floods are presented each $T=4.8$ years; and damaging floods occur every $T=20$ years. The seasonal occurrence of the flooding events in the Austral winter was consistent with winter rainfall amounts. The rates of return period of the maximum rainfall in 24-h reported here have been also evidenced by Pizarro et al., (2012).

The decadal frequency of the events remained stable during the last 50 years, varying at a rate of two to six events per decade. A smaller number of events were registered during 1990s, probably related to the strengthening of the Pacific Subtropical Anticyclone that led to a significant increase of dry years in central Chile (Quintana & Aceituno, 2012). The relative stability registered in the decadal frequency is contradictory with the relative magnitudes of floods in the basin, which have steadily increased and reaching a maximum in the last decade. The number of affected neighbourhoods that increased from 2 per decade between the period of 1960-1999 to 5.5 during the first decade of the 2000s. An increment in flooded neighbourhoods can be explained by the increase of the urbanized surface of high and low density in 700% between 1955 and 2007 (Vidal & Romero, 2010).

When analyzing floods in the lower section of the Andalién River basin in the last 50 years, and their relation to the climate variability associated to ENSO, we have found a similar frequency in the occurrence of floods during the positive, negative and neutral phases of ENSO in the 50 years analysed. This is in accordance with the correlations of standardized rainfall-ENSO for which was determined a significant relation during

spring. These results are consistent with the work of Montecinos & Aceituno (2003), who reported rainfall over the average for the region between 35°-38° S at the end of spring (correlation of 0.59).

Floods in the lower section of the Andalién River basin occurred 38% during positive anomalies, 19% during negative anomalies and 42% during neutral years. The basin behaves similarly to the Chilean Carampangue River basin (37° S), where an analysis of the historical floods (1971-2008) showed that 35% of the cases were associated with positive anomalies, 11.8% with negative anomalies and 52.9% in neutral conditions (Rojas et al., 2010). Most of the rainfall anomalies are related to upper west winds over central Chile. However, the multiple processes involved (e.g. AAO) in the variability of the interannual rainfall during non ENSO winters constrain the predictability of the rainfall during these conditions (Montencinos et al., 2011).

The relation of increased flooding in the Andalién river basin in the last 50 years and its relation with rainfall indices that can be associated to climate change, a decrease of -9.38 mm/decade was measured in total annual rainfall. Also observed was a slight increase in the concentration of the intensity of maximum daily rainfall. An upward trend was found in the concentrated rainfall indices Rx1day (3.6 mm/decade), Rx2day (5.2 mm/decade), Rx3day (4.6 mm/decade), R_{95p}(1.5 mm/decade), R_{99p} (1mm/decade), R30 (0.24 days/decade) and PCI; although most of them without statistical significance. However, the analysis of the indices Rx1day, Rx2day and Rx3day, showed an increment of ~14% upon comparison of the flooding periods 1960-1974 and 1998-2010. Concentration is produced during austral winter months, and these winter months are historically when the most disasters have been reported.

Our results are consistent with those reported by Donat et al., (2013) and Skansi et al., (2013) for South America. Donat et al., (2013) concluded that there was a trend of higher concentration of extreme precipitation, for the period 1951-2010, especially for the months December-May. Skansi et al., (2013), also showed clear trends of higher intensification of the most intense rainfall events, although the majority were not significant. These studies were carried out using the methodology ETCCDI, as recommended by the World Meteorological Organization (WMO).

Changes in annual climate trends at local scale are coherent with Chilean trends reported by Carrasco et al., (2005), who pointed out a rainfall decrease since 1970 and an increase in the intensity at the end of the last century. In this line, Quintana & Aceituno (2012) detected a reduction from -2%/decade to -5%/decade for the period 1950-2007 for the Chilean region, between 37°S and 43°S. In addition, Haylock et al., (2006) documented a negative trend in the indices related to daily rainfall in the southern area of central Chile, such as the frequency of days with rainfall over 10-20 mm (R10 and R20) between 1960-2000. In the present study, a similar trend was found, though it was considered non-significant.

Conclusions

We conclude that the Andalién River Basin presents a high historical recurrence of flood events (1960-2010) $T=2.43$ years, associated to intense events of winter rainfall higher than 150 mm during Austral winter. There exists a relatively homogeneous frequency of floods events in the last 50 years, though relative magnitude has increased 26%. Three cycles were observed. The first period from between 1960 and 1974 with a moderate relative magnitude of floods (7.3). The second cycle began in 1975 and ended in 1997 with a small relative magnitude of floods (7.3). The third cycle 1998-2010 presented a high recurrence of floods of high magnitude (9.2). This increment can hardly be explained by climate indicators associated to the climate change (Rx1day, Rx2day, Rx3day, R_{95p} , R_{99p} , R30) analysed for the complete study period 1960-2010, given that they were statistically non-significant. However, the indices of maximum rainfall (Rx1day, Rx2day and Rx3day), upon analysis for flooding cycles, showed an increase of ~14% between 1960-2010, which could be associated with the increase of 26% in the relative magnitude of the floods in the same period.

It was not possible to determine a cause-effect relationship with warm ENSO-floods that have occurred in May, June and July, associated to variability associated to the warm phase of ENSO. This is because the linking of rainfall-ENSO happens in the spring season. However, the exception is produced during floods that have occurred in August, where the events have taken place in 100% correlation with positive anomalies in El Niño region 3.4. In decadal terms, the lower frequency of events occurred in phases that strengthen the Pacific Anticyclone, as evidenced during the 1990s. In the lower section of the Andalien River basin we have observed a growing trend in the daily maximum rainfall indices (Rx1day, Rx2day and Rx3day) that can be associated to a higher relative magnitude of the reported floods events during the period 1960-2010. With respect to ENSO in its warm phase, we could not confirm a statistically significant relationship with the occurrence of high floods or rainfall in the austral winter for the analysed period.

Acknowledgments

The access to the data used for this work was granted by the *Dirección General de Aguas (DGA)* and *Dirección Meteorologica de Chile (DMC) Gobierno de Chile*. The authors want to thank the CONICYT Advanced Human Capital Program of the Chilean Government, National Doctorate Scholarship, 2011.

References

- Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J., Adler, R., & Brakenridge, R.G. (2010). A digitized global flood inventory (1998–2008): compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, 55(2), 405–422. doi:10.1007/s11069-010-9537-2

- Alarcón, F. (1995). *Evaluación de los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción, a través de la información del Diario El Sur*. Tesis. Universidad de Concepción, Concepción.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6, 661–675.
- Arman, H., Yuksel, I., Saltabas, L., Goktepe, F., & Sandalci, M. (2010). Overview of flooding damages and its destructions: a case study of Zonguldak-Bartın basin in Turkey. *Natural Science*, 02(04), 409–417. doi:10.4236/ns.2010.24050
- Arnone, E., Pumo, D., Viola, F., Noto, L. V., & La Loggia, G. (2013). Rainfall statistics changes in Sicily. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2449–2458. doi:10.5194/hess-17-2449-2013
- Arrau Ingeniería E.I.R.L. (2012). *Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de las Obras de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Bío – Bío*. Dirección de Obras Hidráulicas Gobierno de Chile, Santiago.
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M., Naulet, R., Lemaitre, F., & Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Science*, 3, 583–592.
- Batisani, N., & Yarnal, B. (2010). Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. *Applied Geography*, 30(4), 483–489. doi:10.1016/j.apgeog.2009.10.007
- Bravo, I. (2005). Efectos de la precipitación antecedente sobre la respuesta hidrológica del río Andalién. Tesis, Universidad de Concepción, Concepción.
- Brázdil, R., Kundzewicz, Z., & Benito, G. (2006). Historical hydrology for studying flood risk in Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5), 739–764.
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Storch, H. Von, & Luterbacher, J. (2005). Historical Climatology In Europe – The State Of the Art. *Climatic Change*, 70(3), 363–430. doi:10.1007/s10584-005-5924-1
- Carrasco, J., & Quintana, J. (2004). Descripciones de las condiciones atmosféricas en Chile durante 1997-2000 asociadas a El Niño-La Niña, Oscilación del Sur. In S. Avarria, J. Carrasco, J. Rutllant, & E. Yáñez (Eds.), *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile* (pp. 61–76). CONA, Valparaíso.
- Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 ° C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences*, 50(6), 933–948.
- Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., ... Caballero, Y. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3), 234–243. doi:10.1016/j.crte.2010.02.001
- CONAF. (2008). *Estudio de erosión de la VIII Región*. Fuente Cartográfica.

- Cortesi, N., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & Martin-Vide, J. (2012). Daily precipitation concentration across Europe 1971–2010. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(9), 2799–2810. doi:10.5194/nhess-12-2799-2012
- Devynck, J. (1970). *Contribución al conocimiento de la circulación atmosférica en Chile y al clima de la región del Biobío*. Concepción: Universidad de Concepción.
- DGA. (1999). *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Dietz, J., Hölscher, D., Leuschner, C., & Hendrayanto. (2006). Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 170–178. doi:10.1016/j.foreco.2006.09.044
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 2098–2118. doi:10.1002/jgrd.50150
- Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., & Montes, C. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. (C. Duarte, Ed.) (p. 170). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- EIC Ingenieros Consultores. (2008). *Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto: "Diseño de obras Fluviales Río Andalién, Esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Bío Bío* (pp. 1–96). Santiago: DOP, Ministerio de Obras Públicas.
- Fu, G., Yu, J., Yu, X., Ouyang, R., Zhang, Y., Wang, P., ... Min, L. (2013). Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009. *Journal of Hydrology*, 487, 48–59. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.02.021
- Gemmer, M., Jiang, T., Su, B., & Kundzewicz, Z. W. (2008). Seasonal precipitation changes in the wet season and their influence on flood/drought hazards in the Yangtze River Basin, China. *Quaternary International*, 186(1), 12–21. doi:10.1016/j.quaint.2007.10.001
- Gilroy, K. L., & McCuen, R. H. (2012). A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization. *Journal of Hydrology*, 414-415, 40–48. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.009
- Glaser, R., & Stangl, H. (2003). Historical floods in the Dutch Rhine Delta. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 605–613. doi:10.5194/nhess-3-605-2003
- Haylock, M., Peterson, T., Alves, L., Ambrizzi, T., AnunciaçãO, T., Baez, J., ... Vincent, L. (2006). Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19, 1490–1512. Retrieved from <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3695.1>
- Hernández, T. (1999). *Caracterización Hidrológica y Geomorfológica del río Andalién*. Tesis. Universidad de Concepción, Concepción.

- Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T., Benjamin, A., Wen, S. W., ... Li, X. (2008). Flood hazard in Hunan province of China: an economic loss analysis. *Natural Hazards*, 47(1), 65–73. doi:10.1007/s11069-007-9197-z
- 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324
- Jaque, E. (1996). *Análisis Integrado de los sistemas naturales del río Andalién*. Tesis Doctoral. Universidad de Concepción, Concepción.
- Jaque, E. (2010). Diagnóstico de los paisajes Mediterráneos Costeros. Cuenca del río Andalién, Chile. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 81–97.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. (P. Trad. Gil, Ed.) (p. 422). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London, U.K: Charles Griffin.
- Lim, H. S., Boochabun, K., & Ziegler, A. D. (2012). Modifiers and Amplifiers of High and low Flows on the Ping River in Northern Thailand (1921–2009): The Roles of Climatic Events and Anthropogenic Activity. *Water Resources Management*, 26(14), 4203–4224. doi:10.1007/s11269-012-0140-z
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13,245-259
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico : un instrumento para la planificación urbana. *Eure*, XXVII(81), 97–122.
- Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio de 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas Chile*, 38, 1-25.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16, 281–296.
- Montecinos, A., Kurgansky, M. V., Muñoz, C., & Takahashi, K. (2011). Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4), 557–568. doi:10.1007/s00704-011-0457-1
- Mudelsee, M., Borngen, M., & Tetzlaff, G. (2004). Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway “Zugstrasse Vb.” *Journal of Geophysical Research*, 109(D23), D23101. doi:10.1029/2004JD005034
- Oliver, J. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32(3), 300–309.
- Peña, F., Taveres, C., & Mardones, M. (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano. *Rev. Geográfica de Chile Terra Australis*, 38, 83–107.

- Pettitt A.N (1979) A non-parametric approach to the changepoint problem. *Applied statistics*, 28, 126-135
- Pizarro, R., Valdés, R., García-Chevesich, P., Vallejos, C., Sanguesa, C., Morales, C., ... Fuentes, R. (2012). Latitudinal analysis of rainfall intensity and mean annual precipitation in Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(June), 252–261.
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25, 1–22.
- Rahman, A., & Nawaz, A. (2011). Analysis of flood causes and associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Natural Hazards*, 59(3), 1239–1260. doi:10.1007/s11069-011-9830-8
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192.
- Rojas, O., Martínez, C., & Jaque, E. (2010). Recurrencia Histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, región del Bío-Bío. *Tiempo Y Espacio*, 25, 117–135.
- Rutland, J. (2004). Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. In S. Avarría, J. Carrasco, J. Rutland, & E. Yañez (Eds.), *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile* (pp. 61–76). Valparaíso: CONA.
- Sarricolea, P., Meseguer, O., and Martín-Vide, J., (2014). Variabilidad y tendencias climáticas en Chile central en el período 1950-2010 mediante la determinación de los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 64, 227-247
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63, 1379-1389.
- Skansi, M. D. L. M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., ... Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.004
- Tockner, K., Lorang, M., & Stanford, J. A. (2010). River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts. *River Research and Applications*, 86(December 2009), 76–86. doi:10.1002/rra
- 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. In L. Pérez & R. Hidalgo (Eds.), *Concepción metropolitano (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.
- Yin, Y., Xu, Y., & Chen, Y. (2009). Relationship between flood/drought disasters and ENSO from 1857 to 2003 in the Taihu Lake basin, China. *Quaternary International*, 208(1-2), 93–101. doi:10.1016/j.quaint.2008.12.01

4.3.- Capítulo 3. Inundaciones fluviales en la cuenca del Andalién y su relación con mareas y aumento del nivel del mar debido al Cambio Climático.

Inundaciones fluviales en Chile central: implicancias de las mareas y del aumento del nivel del mar para el siglo XXI

Octavio Rojas¹, María Mardones¹, Carolina Martínez², Luis Flores³, Katia Saéz⁴ & Alberto Araneda⁵.

¹Facultad de Ciencias Ambientales, Departamento de Planificación Territorial y Centro EULA, Universidad de Concepción, Chile

²Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

³Ingeniería E.O.H., Viña del Mar, Chile

⁴Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Estadística, Universidad de Concepción, Chile

⁵Facultad de Ciencias Ambientales, Departamento de Sistemas Acuáticos y Centro EULA, Universidad de Concepción, Chile

Referencia: Manuscrito por enviar a revista *Applied Geography*.

Resumen

Esta investigación analiza el rol de las mareas y del nivel medio del mar en el desarrollo y en la intensidad de las inundaciones fluviales en el curso inferior del río Andalién. Este se emplaza en el margen sur del litoral de Chile Central, al NE de la ciudad de Concepción, la segunda más poblada del país. Para ello se utiliza simulación numérica (1D) para 5 escenarios; y se determinan las áreas potenciales de inundaciones. Se constata la influencia de las mareas en los procesos de inundación hasta 7.3 Km del cauce; se prueba que un 57% de los eventos se relaciona con la ocurrencia de mareas de sicigia. Un ascenso de 60 cm debido al Cambio Climático para fines del siglo XXI en relación a los niveles de marea actuales, provocaría un incremento de 4% de las zonas inundables, 17% de las cuales afectarán a sectores urbanos.

Palabras Claves: inundación fluvial, marea astronómica, marea meteorológica, cambio climático, Río Andalién

Introducción

Las inundaciones fluviales costeras se han convertido en un problema grave a escala global (Yang *et al.*, 2012; Kulkarni *et al.*, 2014). Cerca del 50% de la población mundial

reside en zonas costeras, las cuales están densamente pobladas y son áreas económicamente atractivas (Broekx *et al.*, 2011; García & Loáiciga, 2014; Mah *et al.*, 2011). En el siglo XX ha aumentado la frecuencia y magnitud de los daños debido a desastres en estos ambientes (Dilley *et al.*, 2005); se espera que el riesgo de inundación fluvial se incremente en forma significativa durante el siglo XXI, debido a escenarios de aumento del nivel medio del mar (NMM) por el Cambio Climático Global (CCG) y cambios de uso del suelo, impulsados por el crecimiento socioeconómico (Eliot, 2012; Broekx *et al.*, 2011; Yan *et al.*, 2010; Burrel *et al.*, 2007; Gallien *et al.*, 2011).

Las inundaciones fluviales de cuencas costeras, son detonadas generalmente por precipitación intensa y persistente (Rojas *et al.*, 2014). Cuando los ríos forman estuarios de mezcla, con presencia de zonas llanas, pendiente del cauce débiles y bajo caudal de los ríos, las mareas pueden llegar a constituir un factor determinante en la generación de inundaciones (Mah *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2011; García & Loáiciga, 2014). La marea produce una condición de frontera aguas abajo en el estuario, que sincronizada con flujos altos de caudal causados por elevados montos de precipitación, dificultan la evacuación de las aguas, lo cual aumenta el riesgo de inundación (Morales *et al.*, 2005; Broekx *et al.*, 2011; Jakobsen *et al.*, 2005).

Las mareas altas extremas son causadas por una conjunción de factores astronómicos, meteorológicos y climáticos (Vannéy, 1970; Gallien *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2013). Por factores astronómicos se reconocen mareas de cuadratura (muertas) y sicigias (vivas), en estas últimas se alcanzan los niveles de pleamar más elevados; Rojas & Mardones (2003) establecieron en estuario del río Valdivia (39° S- Chile) una sincronía del 80% entre inundaciones y mareas de sicigia. Adicionalmente, tormentas con vientos intensos y baja presión atmosférica pueden producir grandes alturas de olas, denominadas mareas meteorológicas (Yin *et al.*, 2011); a estas últimas se pueden superponer condiciones climáticas como El Niño Oscilación del Sur, que puede elevar el nivel medio del mar entre 0,1 m a 0,3 m (Gallien *et al.*, 2011).

Los niveles de marea serán afectadas por el CCG, los modelos climáticos globales predicen para el 2100 un aumento de NMM (SLR) entre 0,26-0,85 m, con una alta variabilidad regional (Chust *et al.*, 2010; Broekx *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2013; IPCC, 2013). En Chile, la variación del NMM para escalas históricas no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde 0,32 cm/año a descensos de -0,14 cm/año (Contreras *et al.*, 2012). Para la Bahía de Concepción (36° S) se estableció un aumento de 88 mm en 59 años (1949-2008), que se expresa en una tasa anual de 1,5 mm/año (Contreras *et al.*, 2012). Un estudio previo para la misma bahía, estableció un NMM de 1,10 m para el período 1949-1994, el que sufrió un progresivo aumento a partir del año 1974 (CPPS-PNUMA, 1997). El IPCC (2013) ha estimado para Chile al año 2100 un SLR entre 0,3-0,6 m en los escenarios RCP2.6 (más favorable) y RCP8.5 (más desfavorable).

El territorio chileno ha sido identificado como un país en riesgo de aumento de tormentas e inundaciones fluviales (Kundzewicz & Schellnhuber, 2004) debido a sus características geográficas: variedad climática zonal, relieves montañosos, cambios ambientales, y el poblamiento de las llanuras fluviales (Peña & Klohn, 1990; Rojas *et al.*, 2014). En el período 1900-2012 se produjeron 57 desastres de inundación causados por precipitación en la zona mediterránea chilena, la cual concentra el 73% de la población nacional (INE, 2002) en las áreas metropolitanas de Santiago, Valparaíso y Concepción (AMC), las dos últimas localizadas en el margen litoral.

En el AMC se localiza la cuenca del Río Andalién (36° S), cuya sección inferior desemboca en la bahía de Concepción. Este sector ha experimentado un 700% de crecimiento de la superficie urbanizada entre 1955-2007 (Vidal & Romero, 2010). Entre 1960-2010 se produjeron 21 eventos de inundaciones. De estas, 5 de elevada magnitud se registraron entre 2000-2010 (Rojas & Mardones, 2013). Solamente el costo del desastre del año 2005 a nivel regional, ascendió a U\$6,5 millones según la Oficina Regional de Emergencia (OREMI, citado por Mardones *et al.*, 2004). Aunque se han realizado estudios de inundación fluvial específicos para el área (Pulido, 1992; Hernández, 1999; Mendoza, 2004; Inostroza, 2005; Bravo, 2005; Muñoz, 2007), se desconoce el rol de las mareas y de potenciales aumentos del NMM en el desarrollo de estas crecidas, aspecto prioritario para la adaptación al CCG y la planificación del uso del suelo (Kadam & Sen, 2012; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2013; De Figueiredo, 2013).

El río Andalién forma un estuario de mezcla, por lo cual se postula que los eventos históricos de inundación fluvial con efectos ambientales importantes se relacionarían de manera significativa con la ocurrencia de mareas de sicigia y potenciales aumentos del NMM atribuidos al CCG. El presente estudio explica el efecto de mareas históricas y potenciales aumentos del nivel del mar atribuidos al CCG en la bahía de Concepción sobre las inundaciones fluviales en el curso inferior de la cuenca. Para ello se realizó (1) una caracterización física de la sección inferior de la cuenca con el fin de distinguir los diferentes ambientes (zona baja, media y superior) y (2) una simulación numérica (1D) para una inundación de gran magnitud, que incluyó 5 escenarios con diferentes condiciones de borde (mareas astronómicas, meteorológicas y una proyección del aumento del nivel del mar). Se determinaron las potenciales áreas de inundación sobre las diferentes unidades geomorfológicas y la zona urbana.

Área de estudio

La cuenca del río Andalién (715 Km²), se ubica en la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa (36° S) en la Región del Biobío (Chile). Es una cuenca predominantemente montañosa en más del 60% de la superficie. Las plataformas graníticas ocupan 20% de la superficie total, mientras que las terrazas y llanuras del curso inferior ocupan un área minoritaria (4%) (Jaque, 1996). En esta última sección, se emplaza parte de la ciudad de Concepción (Fig. 3.1). La población al año 2002

alcanzó los 90.000 habitantes y se ha ido incrementando sostenidamente durante las últimas tres décadas, alcanzando densidades de 15.000 hab/km² (Jaque, 2010).

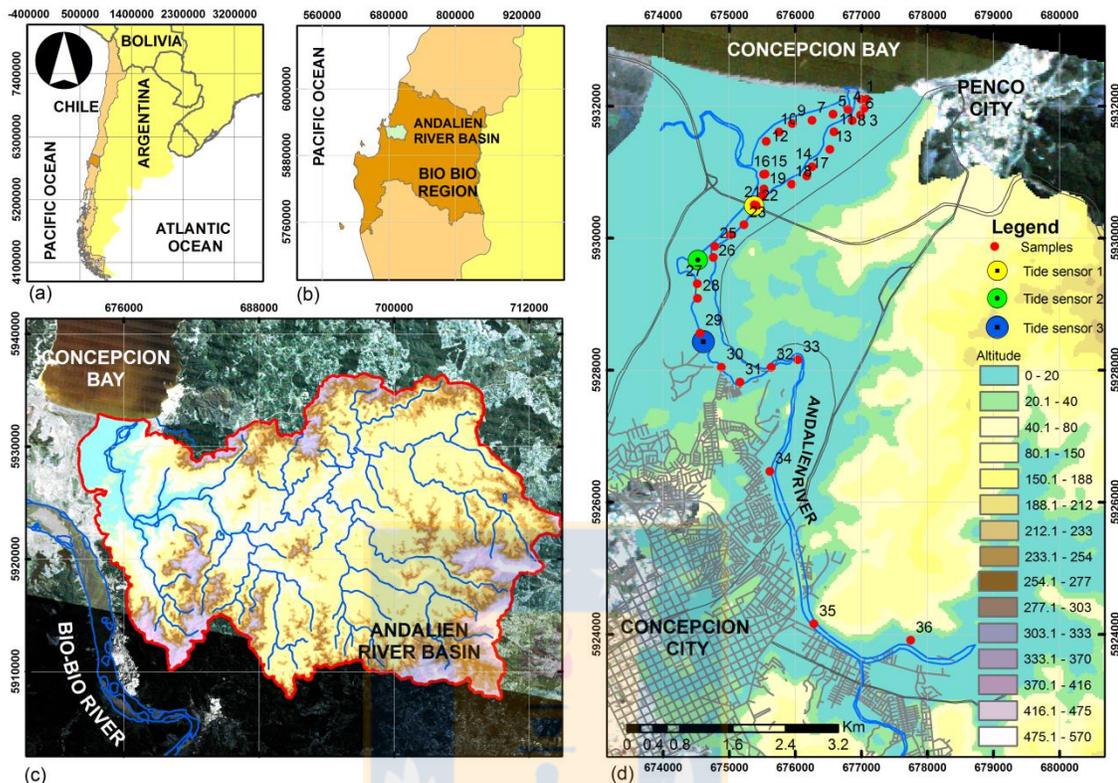


Fig. 3.1 Área de estudio: (a) Contexto sudamericano; (b) contexto regional; (c) cuenca del Andalién con niveles de altitud; (d) curso inferior de la cuenca, se indica posición de estaciones de muestreo de parámetros físico-químicos y sensores de marea.

El clima es templado mediterráneo; con una precipitación anual que fluctúa entre 1.200-1.600 mm anuales en la zona occidental y oriental de la cuenca respectivamente (Devynck, 1970). Son habituales episodios de cinco días de precipitación continua en el invierno austral, con valores punta de 124 mm/24-h (Peña *et al.*, 1993; Mardones *et al.*, 2004). En la sección inferior, el caudal medio anual alcanza los 14 m³ s⁻¹. Durante crecidas se alcanzan fases destructivas en el invierno, para T=50 y T=100 años, se esperan caudales máximos instantáneos de 565 m³ s⁻¹ y 634 m³ s⁻¹ (Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2012).

Antes de desembocar en la bahía de Concepción, el río se transforma en un estuario al NO de la cuenca. El estuario, se extiende desde la desembocadura hasta el Km 3 del cauce principal. En su interior se observan los siguientes rasgos: entre el 0-1 km el cauce principal es único semirectilíneo con procesos de inestabilidad en la flecha litoral y barras por escurrimiento en crecidas; desde 1,1 al 3 Km existe un cauce múltiple con tendencia deltoidea y procesos de acreción del banco estuarial central (1-1,8 Km); entre el 3,4-4,1 Km existe obturación del escurrimiento por bancos de sedimentos (Prisma Ingeniería Limitada, 2004).

Metodología

Caracterización física de la sección inferior de la cuenca

Se realizó una caracterización física de la sección inferior de la cuenca para establecer los diferentes ambientes (zona baja, zona media, zona superior), con el objetivo de determinar la intrusión máxima de la salinidad en el sistema y de validar los resultados obtenidos en el modelo hidráulico aplicado. Para determinar los diferentes ambientes se utilizó análisis de conglomerados; se ejecutó análisis de varianza ANOVA de una vía y para las comparaciones entre zonas (estuario, media, superior) se aplicó el test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Los muestreos de variables físico-químicas representativas para condiciones de primavera e invierno se realizaron los días 21 de noviembre de 2013 y 25 de agosto de 2014, respectivamente. Ambos muestreos se efectuaron en mareas de sicigia y durante un ciclo completo de marea (Perillo & Piccolo, 1993). Se recolectaron datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad (ppt) en la capa de agua superficial y profunda para 9 estaciones en la campaña de invierno y 36, en la de primavera (Fig. 3.1), con la finalidad de detectar la marea de salinidad. El posicionamiento de las estaciones se realizó con GPS doble frecuencia mientras que el valor de profundidad se obtuvo a través de ecosonda digital instalado en bote. Para clasificar las variables físico-químicas se utilizó la clasificación ecológica estandarizada costera y marina, propuesta por Madden *et al.* (2008).

En cada estación, se recolectaron mediante draga manual, muestras de sedimentos superficiales. Las muestras fueron tamizadas 4.0 Φ ; el grano fino se analizó mediante Elzone 282 PC Coulter Counter (Laboratorio de Sedimentología, centro EULA), el grano grueso se analizó mediante tamizado (Laboratorio de Geografía Física, FAUG). En la clasificación de los tamaños texturales se utilizó la clasificación de Wentworth (1922) y para la representación se aplicó el triángulo ternario de Folk *et al.* (1970). La integración de las muestras finas y gruesas se obtuvo aplicando el software GRADISTAT (Blott & Pye, 2001).

Se instalaron tres sensores (Fig. 3.1) de marea marca HOB0 (modelo U20) que operaron de manera continua con ventanas entre 30 a 15 días, con un intervalo de grabación de 5 minutos, registrando las sicigias del mes, con el fin de determinar la influencia de la marea dinámica al interior del estuario para condiciones de primavera. En invierno se utilizaron datos de salinidad registradas en la respectiva campaña.

El estuario fue clasificado según los rangos de mareas de Davies (1964). Para cuantificar el grado de estratificación en el canal estuarino se aplicó el parámetro de mezcla (n_s) (Haralambidou *et al.*, 2010) para cada una de las estaciones de muestreo en ambas campañas. n_s se define como:

$$n_s = \frac{\delta S}{S'_m}$$

Donde $\delta S = S_{prof} - S_{sup}$, $S'_m = 0,5(S_{prof} + S_{sup})$, donde S_{prof} y S_{sup} corresponden a la salinidad en profundidad y superficial en la columna de agua, respectivamente. Si $n_s < 0,1$ la columna de agua se encuentra totalmente mezclada, cuando $0,1 < n_s < 1,0$ la mezcla es parcial y finalmente $n_s > 1,0$ se encuentra estratificado con una presencia de cuña de salina evidente.

Modelación hidráulica y nivel del mar

Se realizó un análisis histórico entre la magnitud relativa de las inundaciones ocurridas en el período 1960-2010 (Rojas, 2015) y los registros de marea astronómica (MA) y meteorológica (MM) que se obtuvieron de las Tablas de Mareas y del mareógrafo del puerto de Talcahuano (36°41'43" S, 73°06'22" O), proporcionados por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (CENDHOC-SHOA). Se calcularon los residuos ($Residuos = MM - MA$) correspondientes a cada magnitud de inundación. La fase lunar para categorizar los registros de mareas en sicigias y cuadraturas, se obtuvieron del *U.S. Naval Observatory*.

Como segundo paso se realizó una modelación hidráulica en una-dimensión (1D) utilizando el software Hec-Ras 4.1 (Brunner, 2010). Se evaluó la marea astronómica para condiciones de cuadratura y sicigia; además se consideraron factores meteorológicos y condiciones atribuidas a escenarios extremos de aumento del nivel del mar asociado al Cambio Climático; la elección de los escenarios utilizados en este estudio son consistentes con los recientes informes del IPCC (2013) y Kopp *et al.* (2014). Para los datos de flujo se consideró un caudal extremo (Q_{max}) para una tasa de retorno de 100 años (probabilidad de excedencia $1 - p = 0,01$) (Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2012)

Los niveles de marea astronómica y meteorológica (SLR_0) para 5 escenarios se obtuvieron del CENDHOC-SHOA para el período 1961-2006, para días en que se produjeron eventos de inundación en la cuenca según Rojas & Mardones (2013). La contribución de aumento del nivel atribuida al cambio climático (ΔSLR) se realizó considerando 2 niveles, tomando como extremos los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Las alturas de mareas totales ($\Delta H_t = SLR_0 + \Delta SLR$) (Tabla 3.1) para 5 escenarios de aumento del nivel del mar (SLS) fueron ingresadas al *software* como condición de borde aguas abajo.

Para los datos geométricos del modelo hidráulico se realizó un levantamiento topobtimétrico. Se utilizaron dos vuelos LIDAR, el primero de ellos con una resolución de 2,5m (Centro de Investigación Marítimo Portuario CIMP). La zona más próxima al cauce se completó con un vuelo de resolución 1m (Dirección de Obras Hidráulicas). Debido a los problemas que poseen los vuelos LIDAR para penetrar bajo la lámina de

agua, la batimetría se construyó a partir de dos fuentes de datos: desde la desembocadura hasta el 4 Km a través de ecosonda GARMIN modelo FF400C y apoyo de GPS doble frecuencia marca TRIMBLE modelo R-4 vinculado a vértices geodésicos. Desde el 4 Km hasta el 12 Km, debido a la baja profundidad, se realizó una corrección del lecho del cauce por criterios de pendiente según lo establecido por Arrau Ingeniería E.I.R.L. (2012). La batimetría y datos topográficos se trabajaron con el Datum WGS-84 y fueron referidos al NMM.

Para la elaboración de los perfiles se utilizó HECgeo-RAS 4.3.1 en ArcGIS 9.3 mediante 3D Analyst Toolset (ESRI, 2009) Esta información permitió obtener 206 perfiles transversales con espaciamiento variable entre 50-100 m para 12,8 km de cauce. Para el canal y la llanura de inundación en cada sección transversal fue ingresado el coeficiente de rugosidad de Manning's (n) (Barnes, 1967), obtenido mediante observación y fotografías georreferenciadas en campo. El coeficiente fue calibrado mediante los trabajos de Inostroza (2005); además de un análisis de sensibilidad $\pm 10\%$ del valor considerado, bajo condiciones obtenidas en terreno para primavera de 2014, considerando un caudal de $36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una condición de borde aguas debajo de 1,5 m.

A partir de los resultados del modelamiento numérico, se elaboraron 5 mapas de inundación fluvial utilizando el SIG ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009). Los resultados fueron cruzados con las unidades geomorfológicas y superficie urbana, que se mantuvieron constantes (U_0) y que fueron establecidas por Rojas (2015) para el año 2011.

Tabla 3.1 Sea-Level escenarios (SLS), H (m)

	Peack Flow (m^3s^{-1})	Astronomical tide	Meteorological tide	SLR_0	ΔSLR	ΔH_t
SLS ₁ -Q ₁₀₀	634	0,50		0,50	-	0,50
SLS ₂ -Q ₁₀₀	634	1,97		1,97	-	1,97
SLS ₃ -Q ₁₀₀	634	1,97	0,37	2,34	-	2,34
SLS ₄ -Q ₁₀₀	634	1,97	0,37	2,34	0,30	2,64
SLS ₅ -Q ₁₀₀	634	1,97	0,37	2,34	0,60	2,94

Resultados

Caracterización física de la sección inferior

En la sección inferior del río Andalién (0-15 Km) se reconocieron tres zonas principales para la campaña de primavera; según las variables salinidad, temperatura, ancho y profundidad del cauce y distribución textural de los sedimentos (Fig. 3.2): zona estuarina baja (desembocadura a Km 2), zona estuarina media (entre los 2-6 Km) y zona superior (valle arriba del Km 6). Las características observadas se resumen en la Tabla N° 3.2.

Tabla 3.2 Zonas estuarinas valle del río Andalién. Condiciones de primavera, año 2013.

Zona estuarina	Estaciones (N°)	P media fondo del cauce (‰)	T°C agua	Salinidad (profundidad)	Sedimentología (predominio)	Sedimentología (Tamaño medio)	Sedimentología (Asimetría, curtosis, Selección)
baja	1-15	0.1	P:Temperada (14,8°C, D.E. 1,22) S: Temperada (16,3°C, D.E. 0,9)	P: polihalinas (26,5 ppt, D.E. 2,12) S: oligohalinas a mesohalinas (7,4 ppt, D.E. 4,41).	Arena, arena gravosa fangosa y arena fangosa	Arena fina.	Asimétricos; leptocúrticos; mal seleccionados
Media	16-29	0.3	P: Temperada (19,7°C, D.E. 2,36) S: Temperada (19,4°C, D.E. 2,96)	P: mesohalinas (12,9 ppt, D.E. 6,26) S: oligohalinas (2,63 ppt, D.E. 1,23)	Arena gravosa fangosa, arena fangosa y fango arenoso	Limo medio a arena gruesa	Asimétricos; amplia fluctuación en la curtosis, desde extremadamente leptocúrticos a muy platicúrticos; muy mal seleccionados
superior	30-36	0.7	Cálida (23.9°C, D.E. 1.59)	Agua dulce (0 ppt)	Arena gravosa y grava arenosa	Arena fina y arena muy gruesa.	Asimétricos; leptocúrticos a muy platicúrticos; muy mal seleccionados

Nota: D.E (Desviación estándar); P (profundidad); S (superficie).

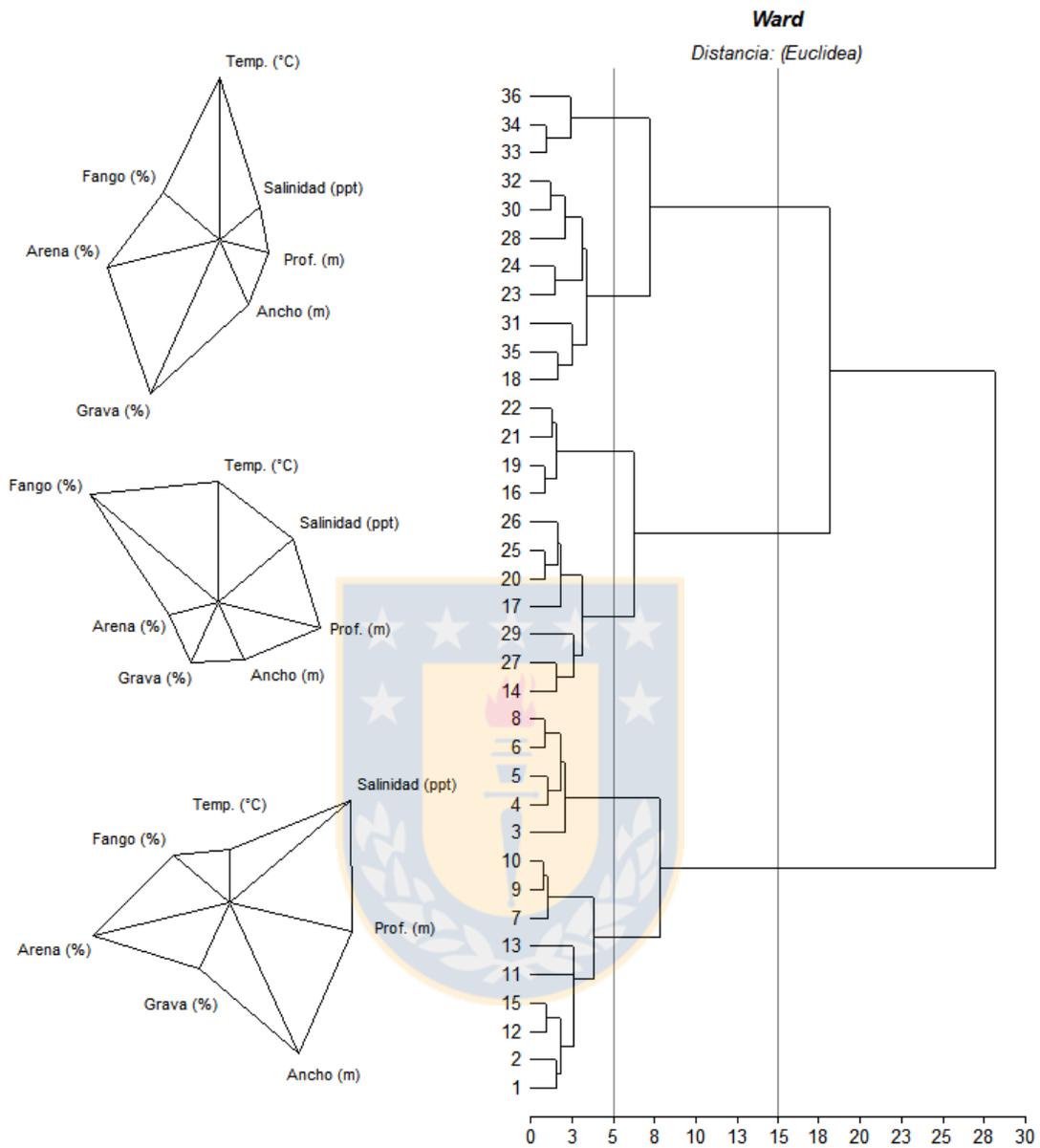


Fig. 3.2 Zonas del estuario según análisis de conglomerados (distancia euclídea)

El análisis de ANOVA mostró diferencias significativas en los tres ambientes ($p < 0,05$) (Tabla 3.2). La temperatura aumentó gradualmente entre la zona baja (Clúster 1) y superior (Clúster 3) (+7,7 °C), mientras que la salinidad decreció en 21,38 ppt. La profundidad en la zona superior fue de aproximadamente 0,7 m, mientras que en la zona baja y media fue > 1 m. El cauce principal fue más ancho en la zona baja (157 m), mientras que la zona media y superior tuvo aproximadamente 65 m. Respecto a la granulometría, el porcentaje de grava fue mayor en la zona superior (16,9%); el porcentaje arena fue muy diferente en los tres ambientes, predominando en la baja

(85,4%) y superior (69%); en cambio el porcentaje de fango fue significativamente mayor en la zona media (66,2%).

Tabla 3.3 Test ANOVA/ Tuckey ($\alpha = 0,05$) para los 3 cluster de la sección inferior de la cuenca.

	Clúster 1	Clúster 2	Clúster 3	valor p
Temp. (°C)	14.91 (1.17) ^c	19.70 (2.45) ^b	22.61 (2.34) ^a	<0.0001
Salinidad (ppt)*	23.63 (4.41) ^a	11.55 (8.09) ^b	2.25 (4.22) ^c	<0.0001
Prof. (m)	1.22 (0.23) ^a	1.06 (0.16) ^a	0.70 (0.26) ^b	<0.0001
Ancho (m)	157.20 (109.02) ^a	61.64 (30.59) ^b	68.18 (47.32) ^b	0.0019
Grava (%)	2.69 (3.45) ^b	1.92 (6.36) ^b	16.91 (15.35) ^a	0.0007
Arena (%)	85.42 (11.66) ^a	31.76 (18.04) ^c	69.98 (13.17) ^b	<0.0001
Fango (%)	11.88 (9.83) ^b	66.27 (18.31) ^a	13.11 (13.20) ^b	<0.0001

Nota: Cifras al interior del paréntesis corresponden a la D.E (Desviación estándar). * Media de la salinidad en profundidad de todas las estaciones del clúster.

Ingreso de la marea en el sistema

El estuario del río Andalién puede ser definido como un estuario de tipo micromareal (rango de marea <2 m) de mezcla parcial. La mayor penetración de la marea dinámica se produjo durante la primavera remontando a 5,9 Km de la desembocadura; la marea de salinidad solo se detectó hasta el 3,5 Km. Las amplitudes máximas de marea se alcanzaron durante sicigia; hacia el interior del estuario se evidenció una progresiva disminución de la amplitud de la onda mareal que se vio afectada por el aumento del caudal del río debido a las precipitaciones.

La máxima amplitud de marea se registró en el sensor en la zona media del estuario, 2,5 km aguas arriba de la desembocadura (Sensor 1), donde se alcanzó 1,45 m el día 13 de julio de 2014 (Tabla 3.3), el mareógrafo de Talcahuano registró una amplitud máxima de 1,6 m en la fecha señalada. El aspecto sinusoidal de la curva de marea estuvo fuertemente condicionado por el aumento del caudal del río debido a las precipitaciones; por ejemplo en la Fig. 3.3-c la onda de marea fue evidente desde el día 8 de agosto, cuando el caudal disminuyó de $208 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (29 de julio) a $< 60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El sensor 2 localizado a 3,5 km de la desembocadura, registró una amplitud máxima de 0,81 m el día 7 de septiembre (Tabla 3.3); para el mismo día el mareógrafo de Talcahuano registró una amplitud de 1,66 m. La onda de marea fue clara mientras el caudal se mantuvo bajo los $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, cuando fluctuó entre el límite anterior y los $65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el rango de la marea se redujo en forma importante (Fig. 3.3-d). La mayor penetración de la onda de marea se produjo en el sensor 3 (Fig. 3.3-e), localizado a 5,9 Km de la desembocadura. El registro osciló entre un máximo de 1,57 m y un mínimo de 0,48 m, la amplitud máxima correspondió a 0,94 m registrada el 6 de noviembre; en la bahía el mareógrafo del puerto de Talcahuano registró para ese día una amplitud de marea de 1,64 m; el caudal del río varió entre $11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Tabla 3.4 Valores característicos de la marea (m) (campaña primavera 2014)

Valor	Sensor 1*	Sensor 2**	Sensor 3***
Promedio	0,55	0,55	0,80
Máximo	1,53	1,32	1,57
Mínimo	0,08	0,17	0,48
Amplitud	1,45	0,81	0,94

*Períodos de medición: *12/07 – 28/09 **06/09 – 26/09 ***31/10 – 19/11

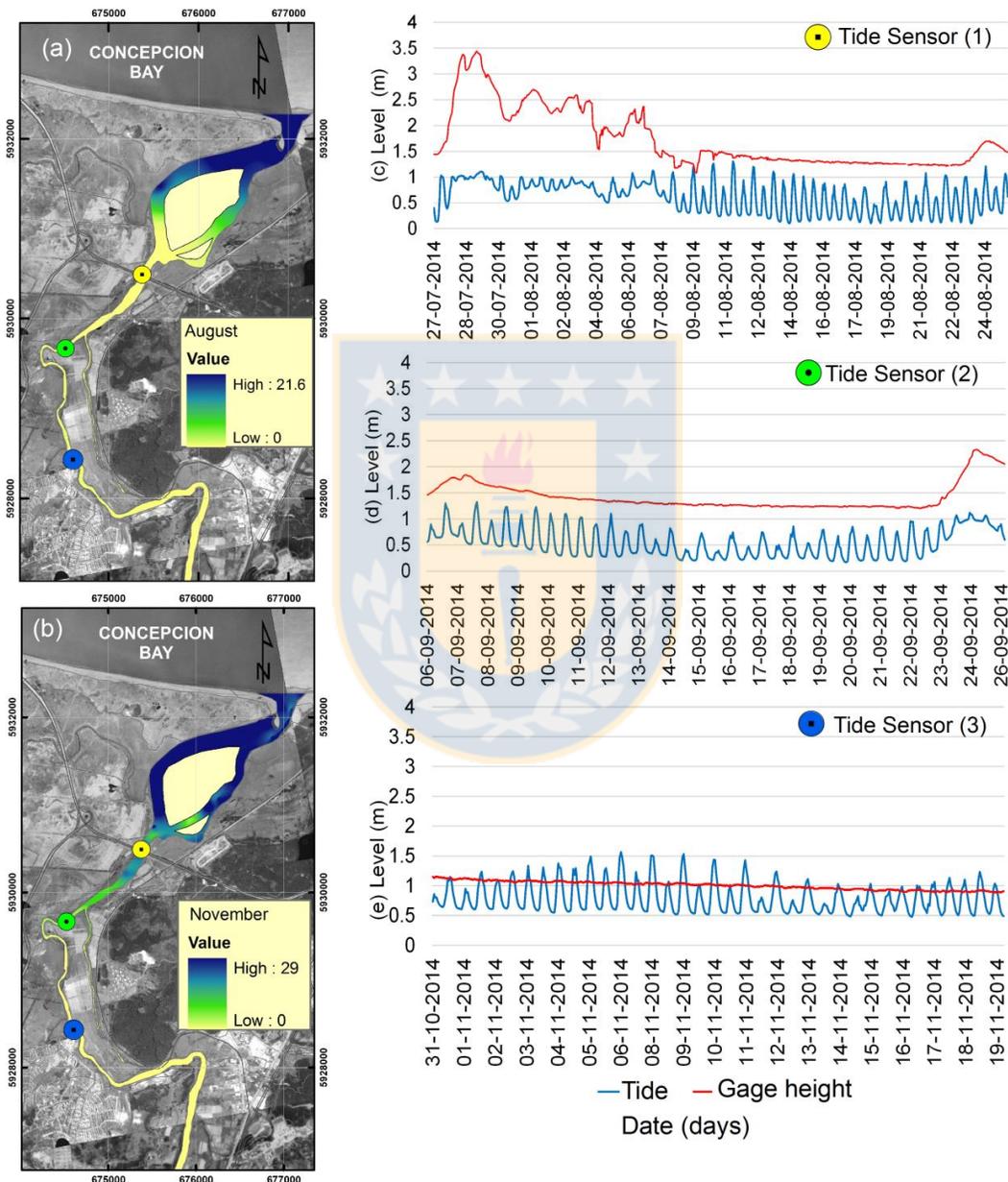


Fig. 3.3 Comportamiento de la salinidad en profundidad 2014 (a) invierno y (b) primavera. Altura limnigráfica estación DGA Andalién Camino a Penco v/s mareas; (c) Puente Las Ballenas 27/07 – 25/08 (d) estación intermedia aeropuerto 06/09 – 26/09 (e) estación superior 31/10 – 19/11.

Respecto al comportamiento de la salinidad, el estuario del Andalién se comportó como un estuario de mezcla parcial. En las estaciones de invierno y primavera; la salinidad superficial siempre fue menor que la salinidad de fondo. En la campaña de invierno y con un caudal del río de $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, la influencia de la marea de salinidad se registró hasta la zona baja (1,78 km) (Fig. 3.3-A), la salinidad de fondo fluctuó entre 21,7-16,6 ppt y la superficial osciló entre 12,7-0,4 ppt en las estaciones 1 y 3 respectivamente. Esta condición derivó en un parámetro de mezcla n_s promedio en el estuario de 1,38 indicativo de una alta estratificación.

Durante la campaña de primavera realizada con un caudal de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, se registró marea de salinidad hasta la zona media a 3,5 km desde la desembocadura (Fig. 3.3-b), donde se midió 3,7-1,6 ppt en profundidad y superficie respectivamente (estación 26). La salinidad de fondo fluctuó entre 23,4-3,7 ppt y la superficial entre 13,6-1,6 ppt en las estaciones 1 y 26 respectivamente; el valor máximo de salinidad se obtuvo en la capa profunda de la zona baja (estación 10) con 29 ppt. El parámetro n_s para primavera fue de 0,9, indicativo de mezcla parcial.

Mareas e inundaciones

Los registros históricos respecto a las condiciones astronómicas durante la ocurrencia de inundaciones, indicaron que un 57% de las inundaciones ocurrieron en condiciones de sicigia o próximas a ellas y un 33% ocurrió en cuadratura. En estas últimas se alcanzó en promedio 1,8 m por condición meteorológica, similar a valores máximos pronosticados durante sicigias. El valor medio de la pleamar durante mareas astronómicas en días de inundación correspondió a 1,63 m ($\pm 0,41$ D.E. 0,23). La marea meteorológica elevó el valor medio de la pleamar a 1,98 m ($\pm 0,55$ D.E. 0,27); los residuos se encontraron +0,39 m en promedio del valor pronosticado.

Según la magnitud relativa de las inundaciones, en inundaciones pequeñas y medianas el valor máximo medio de marea pronosticado fue de 1,63 m (D.E. 0,21) y 1,59 (D.E. 0,24) respectivamente; para grandes inundaciones el valor máximo medio correspondió a 1,78 m (D.E. 0,20). Los registros del mareógrafo se situaron en 2,08 m (D.E. 0,19) para inundaciones grandes y entre 2,02-1,92 m (D.E. 0,24-0,31) para inundaciones pequeñas y medianas respectivamente. Los residuos se situaron en torno a los 0,40 m, sin embargo la variabilidad fue mayor en inundaciones pequeñas (D.E. 0,16) y medianas (D.E. 0,19), mientras que en inundaciones grandes la variabilidad fue menor (D.E. 0,07) (Fig. 3.4).

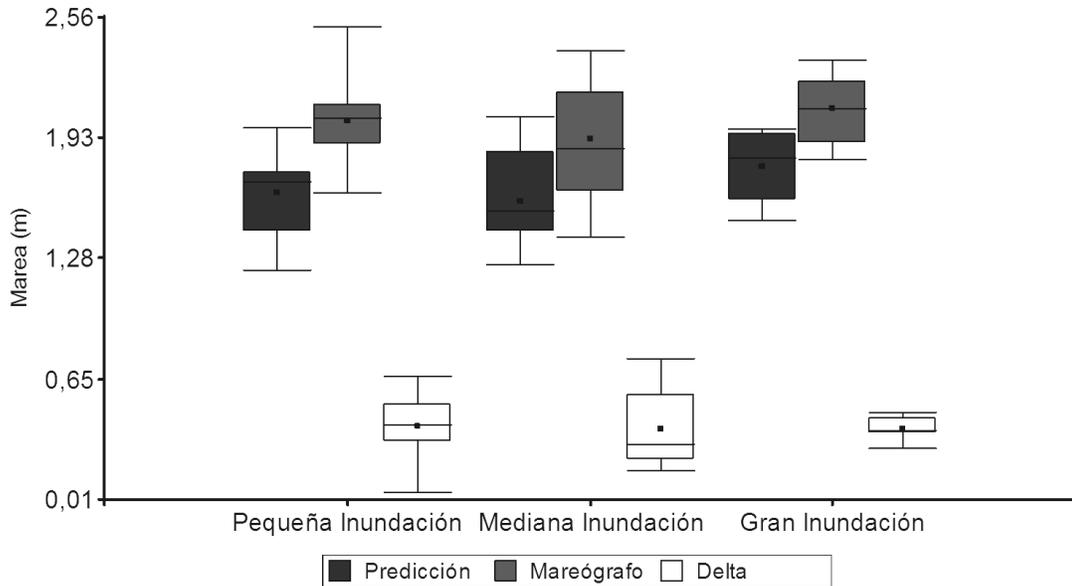


Fig. 3.4 Niveles de marea observados y pronosticados para el puerto de Talcahuano según magnitud relativa de las inundaciones. La línea horizontal y el cuadrado dentro de la caja indican la mediana y la media. El extremo inferior y superior de la caja corresponde al cuantil 0,25 y 0,75. Bigotes inferior y superior cuantil 0,05 y 0,95 respectivamente.

Durante la inundación de gran magnitud del año 2006, los registros del mareógrafo por condiciones meteorológicas son superiores a las predicciones (Fig. 3.5). El máximo nivel de marea observado correspondió a 2,30 m el día 12 de julio, mientras que el pronóstico máximo para ese día estableció 1,97 m. Para la pleamar los residuos fueron en promedio de 0,27 m, mientras que en la bajamar los residuos para ese evento fueron de 0,40 m.

Según la modelación hidráulica realizada para un Q_{100} y diferentes escenarios de nivel del mar, la influencia de la marea en las inundaciones en el peor escenario se observan hasta el 7.3 km desde la desembocadura. Por condiciones astronómicas en el SLS_1 y SLS_2 la influencia de la marea fue menor en la inundación. En el SLS_1 que correspondió a condiciones de marea baja en cuadratura la influencia de la marea en la inundación se extendió hasta los 5 km. En el SLS_2 que correspondió a condiciones de sicigia sin factores meteorológicos, la influencia de la marea se extendió hasta el límite superior de la zona media (6 km).

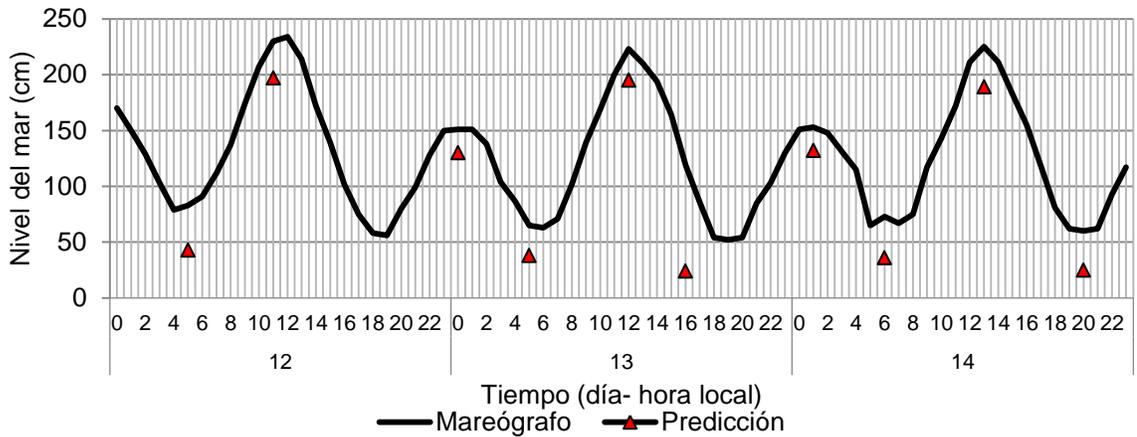


Fig. 3.5 Comparación entre marea observada y predicción mareógrafo de Talcahuano para el periodo 12-14 de Julio de 2006.

Para el escenario SLS₃, que consideró condiciones de sicigia más marea meteorológica, la influencia en la inundación se extendió hasta el límite inferior de la zona superior (7 Km). En los escenarios de Cambio Climático SLS₄ y SLS₅, que consideraron un aumento de 30 y 60 cm del valor máximo de marea, la influencia se extendió como máximo hasta 7,3 km, coincidente con una zona de aumento de pendiente media de fondo del cauce principal a 0.8 por mil (8-14,9 Km). Desde el km 7,3 y hasta el Km 14,9 no se observó influencia de la marea.

El cambio más importante en los 5 escenarios analizados correspondió a las superficies afectadas por la inundación, concentrándose en unidades geomorfológicas de baja pendiente (0,5°) y elevación <3 msnm. Para los SLS₁ y SLS₂ la extensión de la inundación aumentó progresivamente desde el límite N de la plataforma de erosión marina localizada al O del cauce hacia la desembocadura; sin embargo la presencia de la ruta interportuaria y la línea férrea, ambas dispuestas en sentido S-N paralelas al cauce, actuaron como barrera impidiendo una propagación mayor de la crecida, debido que a que se encuentran con una elevación de aproximadamente +2m en relación a las unidades geomorfológicas sobre las cuales fueron construidas (Fig. 3.6).

En el SLS₃ el aumento del nivel por condiciones meteorológicas produce la superación de la ruta interportuaria en el sector NO y la línea férrea en el sector NE ambos cercanos a la desembocadura. La inundación se propaga por la marisma debido a las condiciones de baja altitud de la zona (0.1 m.s.n.m.) Considerando los escenarios de Cambio Climático SLS₄ y SLS₅ la crecida sobrepasó los niveles de la ruta interportuaria y línea férrea en el sector cercano a desembocadura y al E del aeropuerto Carriel Sur. Los máximos niveles de profundidad fluctuaron entre 2-3 m sobre la marisma Rocuant-Andalién y entre 1,5-2 m en zonas de relleno artificial al E del aeropuerto; la velocidad del flujo máxima fue interior a 0,7 m/s en las planicies de inundación de estas zonas.

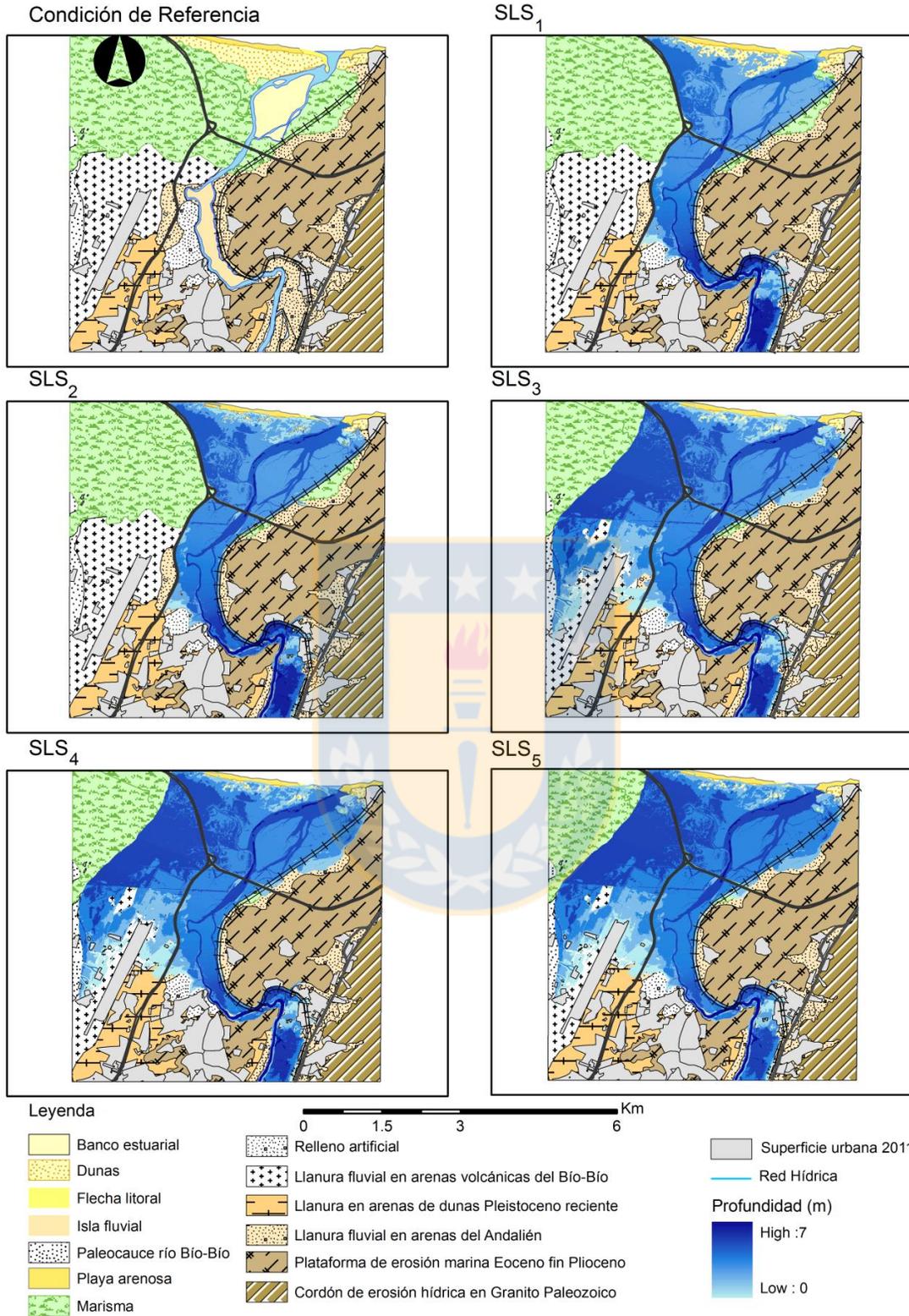


Fig. 3.6 Modelación de inundaciones para una tasa de retorno de 100 años con diferentes escenarios de marea.

Respecto a la extensión de la superficie inundada, por condiciones astronómicas en SLS_1 esta alcanzó 774 ha, mientras que en SLS_2 aumentó a 825 ha; el aumento se concentró en un 72% en las unidades de playa arenosa, flecha litoral y dunas, 12% de unidades de marisma, 13,8% en la llanura fluvial del Andalién (Fig. 3.7). Las condiciones meteorológicas evaluadas en el SLS_3 aumentaron la superficie a 1.352 ha inundadas, que se concentraron un 52% en la marisma, 35% en la llanura fluvial conformada por arenas volcánicas del Biobío y un 7,3% en la llanura fluvial del río Andalién. Esta última condición de simulación entregó una extensión de inundación similar a la acontecida en junio de 2006, la que no afectó al aeropuerto Carriel Sur (Fig. 3.8).

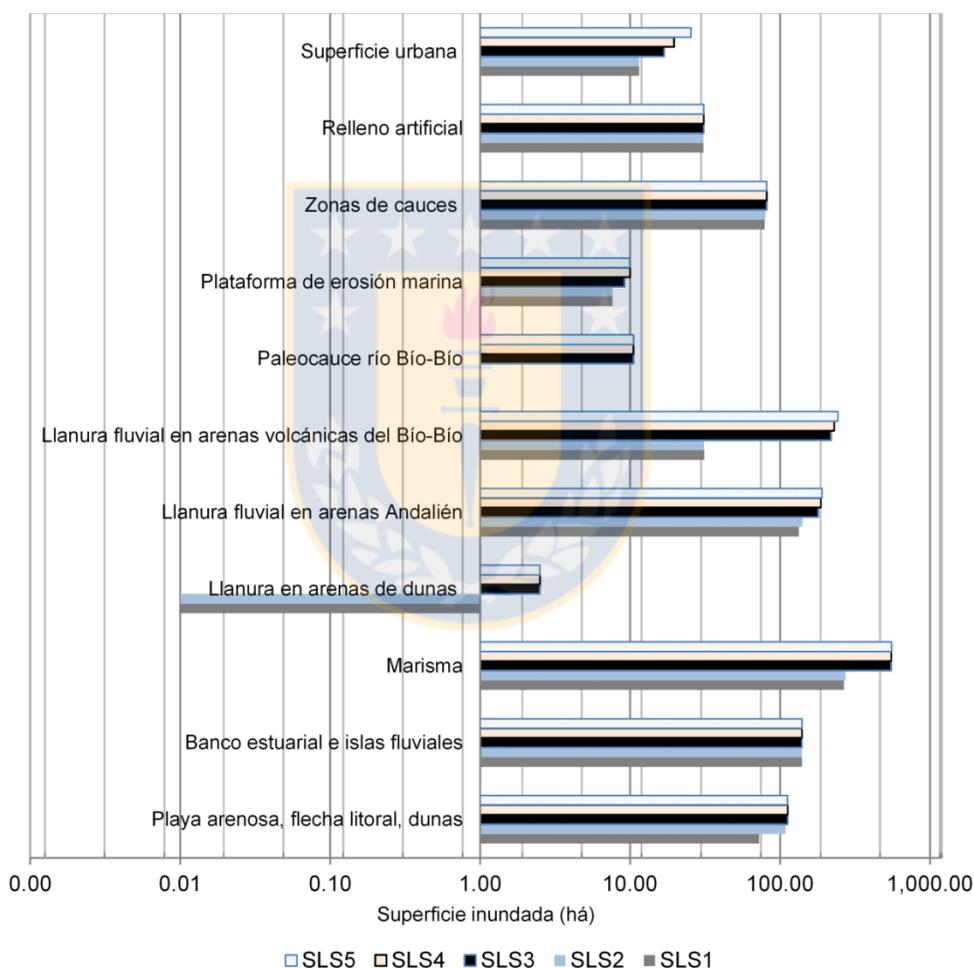


Fig. 3.7 Superficies de unidades inundadas según SLS (escala logarítmica base 2)

Un aumento potencial de 30 cm (SLS_4) y 60 cm (SLS_5) en el nivel del mar debido al Cambio Climático para fines del siglo XXI provocará la inundación adicional 25 ha y 50 ha respectivamente, en comparación al peor escenario actual SLS_3 . Las unidades más afectadas serán la llanura fluvial conformada por arenas volcánicas del Biobío (49,5%),

la llanura fluvial del Andalién construida principalmente por arenas cuarcíferas (21,1%), la zona de marisma (10,6%) y el área urbana (17%). La superficie urbana será afectada principalmente en la ruta interportuaria y línea férrea, además se deben considerar las zonas de relleno artificial que actualmente experimentan un proceso de urbanización y que según nuestros resultados, se emplazan en un sector susceptible a inundarse.

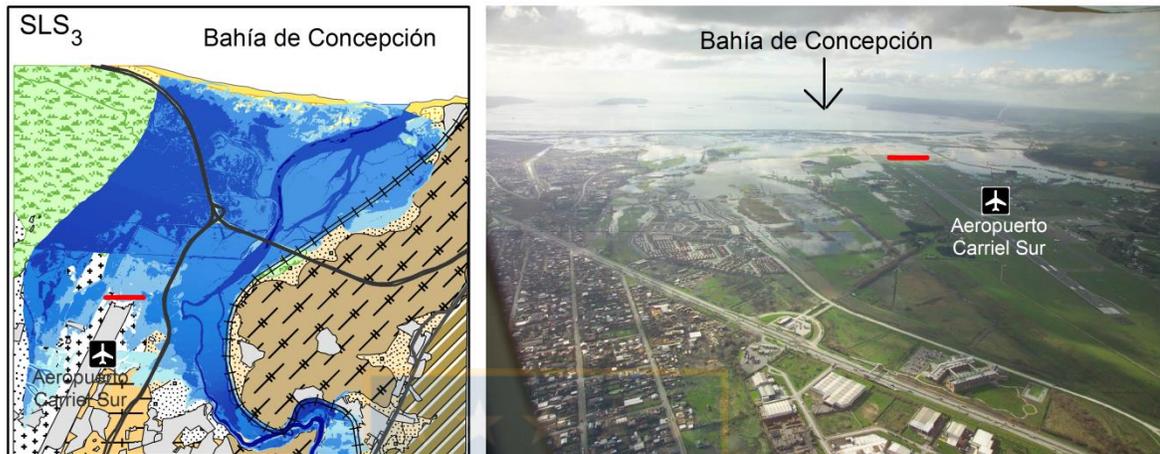


Fig. 3.8 Comparación SLS₃ e inundación año 2006. Fotografía de Didier RoussetBuy.

Discusión

El río Andalién forma un estuario de tipo micromareal con rangos medios de marea <2 m. La relación realizada entre el registro de inundaciones históricas y los niveles de marea, determinó que un 57% de las inundaciones ocurrieron en condiciones de sicigia o próximas a ellas. En el sur de Chile, Rojas & Mardones (2003), establecieron para el estuario micromareal del río Valdivia (39° S- Chile), una sincronía del 80% de los casos entre inundaciones y mareas de sicigia. Según Garcés-Vargas *et al.* (2013), dicho estuario se comportó en invierno como de cuña salina, sus profundidades varían entre 7-22 m y la influencia de la marea se extiende hasta 50 km hacia el interior de su desembocadura, a diferencia del estuario del río Andalién, que se comportó en invierno como un estuario de mezcla con alta estratificación, con profundidades variables (0,5-2,5 m) y una propagación de la marea dinámica hasta 5,9 Km.

El 33% de los eventos restantes en el Andalién ocurrieron en cuadratura, en estas últimas se alcanzó en promedio 1,8 m por condiciones meteorológicas (aumentos del orden de 0.39 m), similar a valores máximos pronosticados durante sicigias. Morales *et al.* (2005) en la Ría de Huelva (estuario de los ríos Odiel y Tinto) al SO de España, demostraron que la marea meteorológica es de importancia en los procesos de inundación elevando el nivel de la marea hasta 1 m por encima de la pleamar correspondiente. También Flick (1998) en California (Estados Unidos) encontró una alta concordancia de inundaciones y las fases coincidentes con mareas altas

astronómicas y de tormentas, las que pueden producir un aumento de 0,2-0,3 m en el nivel de la marea en horas.

Los resultados del modelo numérico son concordantes en reconocer la influencia de la marea, en los desbordes del río para la zona media y baja. En los escenarios SLS₁ y SLS₂ la influencia de la marea dinámica se extendió hasta el 6 km. Para un gran evento como el del año 2006 (SLS₃), la superficie de inundación en la zona media y baja, coincidió con el modelo numérico; para dicho evento se simuló con una altura de marea aguas abajo de 2,34 m, que correspondió a la máxima altura de la pleamar en sicigia más la influencia meteorológica, sin embargo la máxima influencia de la marea se registró hasta el 7 km.

En los escenarios que incluyeron aumentos del nivel medio del mar para fines del siglo XXI debido al Cambio Climático (SLS₄-SLS₅), la influencia de la marea se produjo hasta el 7.3 Km; el aumento de 60 cm como escenario extremo se tradujo en un aumento de 50 ha (4%) de la superficie inundada, en relación a peor escenario actual SLS₃. Otras investigaciones han evaluado los impactos de un aumento en el SLR en áreas costeras y estuarinas; por ejemplo Mah *et al.* (2011) en la ciudad de Kuching (1° N) emplazada a 30 Km del mar con una altitud de 5 m (Malasia), en el delta del río Sarawak; concluyeron que un incremento del 10% en los niveles de marea actual, resultará en un aumento de las áreas de inundación hasta en un 6% en relación con los niveles de marea existentes. En dicha área las magnitudes de mareas son muy superiores a las registradas en el río Andalién, alcanzando un nivel medio del mar de hasta +4.5 m, esto se puede comprobar con la influencia que ejerce la marea hasta 30 Km valle arriba de la desembocadura del río Sarawak.

Chust *et al.* (2010) determinaron en la costa de Gipuzkoa, Bahía de Biscay (43° N) al norte de España; que un aumento de 48,7 cm para fines del siglo XXI, inundarán 110,8 ha de la zona supralitoral, principalmente en el área estuarina debido a su morfología llana y plana. En las investigaciones de Chust *et al.* (2010) y Mah *et al.* (2011) las áreas de estudio corresponden a franjas tectónicamente estables. Kuching, se emplaza a 1.320 Km de la zona de subducción entre las placas Australiana y de Sunda (Benz *et al.*, 2011), el área no presenta subducción desde el Mioceno (Di Leo *et al.*, 2012); para el caso de los estuarios mencionados en la Bahía de Biscay, la sismicidad es de baja magnitud (3-5°), escasa frecuencia y superficial (López-Fernández *et al.*, 2008).

En la proyección de aumento del NMM para la Bahía de Concepción (+60 cm) fueron utilizadas proyecciones del IPCC (2013) para la zona central de Chile. Kopp *et al.* (2014) determinaron para el puerto de Valparaíso en la zona central de Chile (33° S) que su sensibilidad al aumento del NMM se encuentra cerca del promedio global, estimándose un ascenso probable para el 2100 entre 0,4-0,8 m. Sin embargo estos estudios no consideran el aumento o descenso del NMM debido a la actividad tectónica diferencial de bloques que se genera en el margen continental activo sudamericano, que hace que la determinación de escenarios de aumentos del NMM sea difícil de establecer a escala histórica (Molina *et al.*, 2011; Isla *et al.*, 2012; Albrecht,

comunicación personal, 2015), a diferencia de lo que ocurre en zonas tectónicamente estables como en la Bahía de Biscay o Kuching.

La Bahía de Concepción se emplaza en una zona tectónicamente activa; asociada a la subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana cuya convergencia se produce a 6,8 cm/año (Kaizuka *et al.*, 1973; Vargas *et al.*, 2011). Para el área de estudio los terremotos de 1835 (magnitud estimada de ca. 8,5) y 1960 (magnitud estimada de ca. 8,1) causaron un alzamiento cosísmico de 1,2-2,4 m y 2 m respectivamente (Kaizuka *et al.*, 1973). En el reciente terremoto (magnitud de momento $M_w=8.8$) de 2010 el desplazamiento vertical asociado no fue uniforme; la zona cercana a la línea de costa que va desde Talcahuano por la ruta interportuaria hasta el río Andalién presentaron alzamiento de alrededor de 50 ± 10 cm, mientras que diversos puntos medidos ingresando por la Cordillera de la Costa presentaron subsidencia, como es el caso del observatorio TIGO de -4 cm (Rivas, 2012; Pulido *et al.*, 2011; Quezada *et al.*, 2010).

Posterior al alzamiento cosísmico se experimenta una subsidencia intersísmica, que provoca un descenso de los niveles del alzamiento (Quezada *et al.*, 2012). Sin embargo a pesar de estos ciclos, la tendencia es al solevantamiento en los últimos tres terremotos de importancia en la zona; lo que se comprueba con las tasas calculadas cada 100 años (100y) por Kaizuka *et al.* (1973) mediante C-14 para los últimos 4.000 años, quienes determinaron ascensos de 0,55m/100y en la Isla Mocha, 0,08m/100y en Isla Santa María y 0,25 m/100y al oeste de la Península de Arauco (37° S). Sin embargo en esta zona (Golfo de Arauco) los alzamientos cosísmicos han sido mayores que en Concepción, por ejemplo los terremotos de 1835 y 2010 causaron un solevantamiento de la isla Santa María de 3 m y $2,6\pm 0,5$ m respectivamente (Vargas *et al.*, 2011).

La tendencia al solevantamiento determina que los escenarios futuros con respecto al SLR para el territorio en estudio sean compensados (Contreras *et al.*, 2012). Además los solevantamientos cosísmicos (sumados al descenso relativo del nivel del mar) implican abruptas caídas en el nivel de base de los ríos; por ejemplo los alzamientos co-sísmicos en la costa de la región del Biobío provocados por el terremoto de 2010 en los ríos Lebu ($1,72 \pm 0,10$ m) y los ríos Tubul y Raqui (1,4 m) (Vargas *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2012), modificaron el nivel de base de los ríos, influyendo en descargas más rápidas, disecación de los canales y aumento de la erosión, disminuyendo el efecto de la influencia de la marea en las inundaciones. Por el contrario en áreas de subsidencia tectónica, se ha determinado que el hundimiento contribuye a la mayoría del aumento relativo del nivel medio del mar (RSLR), llegando a representar el 60% a 70%; esto fue calculado para Shanghai (China) (Gong & Yang, 2008, citado por Yin *et al.*, 2011).

Conclusiones

En la sección inferior del Andalién se distinguieron tres ambientes bien definidos según sus características físicas: una zona baja con sedimentos predominantemente compuestos por arena fina (desembocadura – 2Km), zona media con sedimentos fangosos (entre los Km 2-6 Km) y una zona superior donde predominó la arena fina y gruesa (desde el 6 Km). El estuario del río correspondió a uno micromareal (rango de marea < 2 m) de mezcla parcial; la estratificación fue más alta en invierno ($n_s = 1,38$) y parcial en primavera ($n_s = 0,9$) con caudales de $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. La máxima penetración de la marea de salinidad alcanzó los 3,5 Km y la marea dinámica 5,9 Km desde la desembocadura. El aspecto sinusoide de la curvas de marea se vio afectado por caudales de $> 60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a 2,5 Km de la desembocadura.

Las mareas influyeron en los procesos de inundación hasta el 7 Km desde la desembocadura, limite cercano al determinado en la marea dinámica. El 57% de los eventos de inundación ocurrió en condiciones de sicigia o próximas a ella, mientras que el 33% de los eventos se desarrolló en condiciones de cuadratura; sin embargo en estas últimas se demostró que las marea meteorológica puede elevar el nivel máximo de la pleamar astronómica a umbrales similares a las registradas en sicigia (aumentos del orden de 0.39 m). Las situaciones de peligrosidad más importante ocurrieron en fases coincidentes de mareas de sicigias y tormentas, como aconteció durante la inundación catastrófica del año 2006, donde el nivel de marea máximo pronosticado fue de 1,97 m, sin embargo la marea observada correspondió a 2,30 m.

Un ascenso de 60 cm atribuidos al Cambio Climático en el escenario SLS₅ para fines del siglo XXI en relación a los niveles de marea actuales provocaría un incremento de las zonas inundables en un 4% en relación al peor escenario actual SLS₃; las superficies inundadas se concentraran en áreas naturales aún no urbanizadas (83%) y áreas urbanizadas actualmente (17%). Unidades de baja altitud como marisma Rocuant-Andalién y las llanuras adyacentes resultan inundadas con profundidades variables entre 3-2 m. Es probable, que zonas urbanas en peligro de inundarse aumenten dado la creciente expansión urbana que evidencia el área y los proyectos inmobiliarios en proceso de ejecución como la Plataforma Logística.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Programa BECAS DOC-NACIONAL Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile CONICYT (Gastos Operacionales N° 21110383) Gobierno de Chile y VRID enlace 214.603.015-10 Dirección de Investigación Universidad de Concepción. Agradecemos los datos aportados por: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y del Centro de Investigación Marítimo Portuario CIMP de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Referencias

- Arrau Ingeniería E.I.R.L., (2012). *Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de las Obras de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Bío – Bío*. Santiago: Dirección de Obras Hidráulicas Gobierno de Chile.
- Barnes, H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. USGS, Washington
- Benz H.M., Herman, M., Tarr, A.C., Hayes, G.P., Furlong, K.P., Villaseñor, A., Dart, R.L., & Rhea, S. (2011). *Seismicity of the Earth 1900–2010 Australia plate and vicinity: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1083-G*, scale 1:15,000,000.
- Blott, S., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 (11), 1237–1248
- Bravo, I. (2005). *Efectos de la precipitación antecedente sobre la respuesta hidrológica del río Andalién*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción. 125 pp.
- Broekx, S., Smets, S., Liekens, I., Bulckaen, D., & Nocker, L. De. (2011). Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach. *Natural Hazards*, 245–266. doi:10.1007/s11069-010-9610-x
- Brunner, G.W., (2010). *HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Burrell, B. C., Davar, K., & Hughes, R. (2007). A Review of Flood Management Considering the Impacts of Climate Change. *Water International*, 32(3), 342–359. doi:http://dx.doi.org/10.1080/02508060708692215
- Chust, G., Caballero, A., & Marcos, M. (2010). Regional scenarios of sea level rise & impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 87, 113–124. doi:10.1016/j.ecss.2009.12.021
- Comisión Permanente del Pacífico Sur CPPS-PNUMA. (1997). *Evaluación de la vulnerabilidad de las áreas costeras a incrementos en el nivel del mar como consecuencia del calentamiento global: caso de estudio-Bahía de Concepción, Chile*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. CPPS/PNUMA/PSE/IE(97)6. 106 pp.
- Contreras, M., Winckler, G., & Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. In *Anales del Instituto de Ingenieros* (Vol. 124, pp. 54–66).
- Davies, J. L. (1964). A morphogenetic approach to World shorelines. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 8, 127-142
- De Figueiredo, S. (2013). Modeling climate change effects in southern Brazil *Journal of Coastal Research*, 65, 1933-1938.
- Devynck, J. (1970). *Contribución al conocimiento de la circulación atmosférica en Chile y al clima de la región del Biobío* (p. 165). Universidad de Concepción.

- Di Leo, J. F., J. Wookey, J. O. S. Hammond, J.-M. Kendall, S. Kaneshima, H. Inoue, T. Yamashina, & Harjadi, P. (2012), Mantle flow in regions of complex tectonics: Insights from Indonesia, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q12008, doi:10.1029/2012GC004417.
- Dilley, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., & Arnold, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots A Global Risk* (p. 148). Washington D.C.: The World Bank.
- Eliot, M. (2012). Sea level variability influencing coastal flooding in the Swan River region, Western Australia. *Continental Shelf Research*, 33, 14–28. doi:10.1016/j.csr.2011.08.012
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2009). ArcGIS 9.3. Redlands, USA: www.esri.com
- Flick, R.E., (1998). Comparison of California tides, storm surges, and mean sea level during the El Niño winters of 1982–1983 and 1997–1998. *Shore and Beach*, 66 (3), 7–11.
- Folk, R., Andrews, P. & Lewis, D. (1970). Detrital sedimentary rock classification & nomenclature for use in New Zeland. New Zeland. *Journal of Geology & Geophysics*, 13, 937-968.
- Gallien, T. W., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2011). Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework & data requirements. *Coastal Engineering*, 58(6), 567–577. doi:10.1016/j.coastaleng.2011.01.011
- Garcés-Vargas, J., Ruiz, M., Pardo, L. M., Nuñez, S. & Pérez-Santos, I. (2013). Caracterización hidrográfica del estuario del río Valdivia, centro-sur de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41 (1), 113-125
- García, E., & Loáiciga, H. (2014). Sea-level rise & flooding in coastal riverine flood plains. *Hydrological Sciences Journal*, (October), 37–41. doi:10.1080/02626667.2013.798660
- Haralambidou. K., Sylaios, G., & Tsihrintzis, V.A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90, 174-184
- Hernández, T. (1999). *Caracterización hidrológica y geomorfológica del río Andalién*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción. 106 pp.
- INE. (2002). *Censo de Población y vivienda*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Inostroza, A. (2005). *Crecidas en la Andalién bajo: análisis hidráulico de las intervenciones en su planicie de inundación*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción. 143 pp.
- 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324

- Isla, F.; Quezada, J.; Martínez, C.; Fernández, A. & E. Jaque. (2012). The evolution of the Bío Bío delta & the coastal plains of the Arauco Gulf, Bío Bío Region: the Holocene sea-level curve of Chile. *Journal of Coastal Research*, 28: 102-111.
- Jakobsen, F., Hoque, A., Paudyal, G.N., Bhuiyan, M. (2005). Evaluation of the short-term processes forcing the monsoon river floods in Bangladesh. *Water International*, 30(3), 389–399. doi:10.1080/02508060508691880
- Jaque, E. (1996). *Análisis Integrado de los sistemas naturales del río Andalién*. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción.
- Jaque, E. (2010). Diagnóstico de los paisajes Mediterráneos Costeros. Cuenca del río Andalién, Chile. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 81–97.
- Kadam, P., & Sen, D. (2012). Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (October 2014), 37–41. doi:10.1080/09715010.2012.695449
- Kaizuka, S., Matsuda, T., Nogami, M. & Yonekura, N., (1973). Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco Peninsula and its environs, Central Chile. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 8, 1-49.
- Kopp, R., Horton, R., Little, C., Mitrovica, J., Oppenheimer, M., Rasmussen, D., Strauss, S., & Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st & 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 383–407. doi:10.1002/2014EF000239.Abstract
- Kulkarni, A., Eldho, T., Rao, E., & Mohan, B. (2014). An integrated flood inundation model for coastal urban watershed of Navi Mumbai, India. *Natural Hazards*, 403–425. doi:10.1007/s11069-014-1079-6
- Kundzewicz, Z. W., & Schellnhuber, H. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31, 111–128.
- López-Fernández, C., Pulgar, J.A., Gallar, J., González-Cortina, J.M., Díaz, J., & Ruíz, M. (2008). Zonación sismotectónica del NO de la Península Ibérica. *Geo-Temas*, 10, 1-4
- Madden, C.; Goodin, K.; Allee, R.; Bamford, D. & Kinkbeiner, D. (2008). Clasificación Ecológica Estandarizada Costera y Marina- Versión III: La clasificación de referencia para hábitats marinos para la Red Temática de Ecosistemas IABIN. *Nature Serve*, 36 pp.
- Mah, D., Putuhena, F., & Lai, S. (2011). Modelling the flood vulnerability of deltaic Kuching City, Malaysia. *Natural Hazards*, 865–875. doi:10.1007/s11069-011-9731-x
- Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas Chile*, 38, 1–25.
- Mendoza, F. (2004). *Desarrollo de un modelo de pronóstico de crecidas para la cuenca del río Andalién*. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción 73 pp.

- Molina, M., Contreras, M., Winckler, G., Salinas, S., & Reyes, M. (2011). Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el Diseño de obras marítimas en Chile Central. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (Vol. 123, pp. 77–88).
- Morales, J. A., Pons, J. M., & Catano, M. (2005). Introducción al análisis de los riesgos de inundación en las riberas de las áreas estuarinas : El caso de las poblaciones adyacentes a la Ría de Huelva (SO España). *Geogaceta*, 37, 243-246.
- Muñoz, M. (2007). *Análisis de crecidas a través de balance hídrico: aplicación al río Andalién mediante embalse lineal*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad del Bío-Bío.
- Peña, F., Taveres, C., & Mardones, M. (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 38, 83–107.
- Peña, H., & Klohn, W. (1990). Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico. *Revista de La Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(1), 21–38.
- Perillo, G. & M. Piccolo. (1993). Methodology to study estuarine cross-sections. *Revista Geofísica*, 38: 189-206.
- Prisma Ingeniería Limitada. (2004). *Diagnóstico y Proposición de Soluciones Rio Andalién, Comuna de Concepción, VIII Region. M.O.P. - D.O.H.* Gobierno de Chile.
- Pulido, H. (1992). *Estudio hidrológico forestal de la cuenca del río Andalién*. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción. 77 pp.
- Pulido, N., Yagi, Y., Kumagai, H. & Nishimura, N. (2011). Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule Earthquake, Chile. *Earth Planets Space*, 63, 1–4.
- Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A., Vásquez, D. (2012). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 53, 35-55.
- Quezada, J.; Jaque, E.; Belmonte, A.; Fernández, A.; Vásquez, D. & Martínez, C. (2010). Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro – sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, 2, 11 – 45.
- Rivas, L. (2012). *Red Geodésica Nacional SIRGAS – Chile*. Departamento Geodésico Instituto Geográfico Militar Chile. Presentación.
- Rojas, C., & Mardones, M. (2003). Las Inundaciones en la ciudad de Valdivia. Eventos Históricos 1899-2002. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 34, 225-242.
- Rojas, O. (2015). *Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del Centro sur de Chile*. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción.
- Rojas, O. & Mardones, M. (2013). *Inundaciones Fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile (1960-2010). Tendencias, recurrencia y relación con el fenómeno ENSO*. XXXIV

Congreso Nacional y XIX Internacional de Geografía, Universidad del Biobío. Octubre, Concepción, Chile.

- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192..
- Vannéy, J. (1970). *L'Hydrologie du bas Guadalquivir* (p. 175). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S. & Melnick, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38 (1), 219-238.
- 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. In: Pérez, L. & Hidalgo, R., *Concepción metropolitana (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade & class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392.
- Yan, Y., Ouyang, Z., Guo, H., Jin, S., & Zhao, B. (2010). Detecting the spatiotemporal changes of tidal flood in the estuarine wetland by using MODIS time series data. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 156–163. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.019
- Yang, Z., Wang, T., Khangaonkar, T., & Breithaupt, S. (2012). Integrated modeling of flood flows & tidal hydrodynamics over a coastal floodplain. *Environ Fluid Mech*, 63–80. doi:10.1007/s10652-011-9214-3
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J., & Reyes, E. (2013). Understanding the Coastal Ecosystem-Based Management Approach in the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, 63, 243-261.
- Yin, J., Yin, Z., Hu, X., Xu, S., Wang, J., Li, Z., Zhong, H., & Gan, F. (2011). Multiple scenario analyses forecasting the confounding impacts of sea level rise & tides from storm induced coastal flooding in the city of Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*, 407–414. doi:10.1007/s12665-010-0787-9
- Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Wang, J., & Xu, S. (2013). Modelling the combined impacts of sea-level rise & land subsidence on storm tides induced flooding of the Huangpu River in Shanghai, China. *Climatic Change*, 919–932. doi:10.1007/s10584-013-0749-9

4.4.- Capitulo 4. Expansión urbana y desastres por inundaciones fluviales en la cuenca del Andalién.

Expansión urbana y desastres por inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile (1943-2011)

Octavio Rojas¹, María Mardones¹, Carolina Rojas², Carolina Martínez³ & Luis Flores⁴

¹Facultad de Ciencias Ambientales, Departamento de Planificación Territorial y Centro EULA, Universidad de Concepción, Chile.

²Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía, Departamento de Geografía, Universidad de Concepción, Chile.

³Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

⁴Ingenería E.O.H. Viña del Mar, Chile

Referencia: Manuscrito por enviar a revista *Habitat International*.

Resumen

Se estudia el curso inferior del río Andalién situado en la costa del Área Metropolitana de Concepción (AMC), segunda más poblada de Chile. Esta zona ha experimentado un 700% de crecimiento de la superficie urbana entre 1955-2007, con un registro de 21 eventos de inundaciones en los últimos 50 años. Se evalúa y zonifica áreas de peligrosidad de inundación fluvial para tasas de retorno entre 2 y 500 años, y se determina e identifica cambios de uso de suelo urbano entre 1943-2011. Para ello se realiza un análisis (1) de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana mediante fotointerpretación, y (2) de los desastres fluviales mediante modelación numérica (1D). Se determinó que la superficie urbana se incrementó en 1,458 ha en tejidos muy vulnerables ante futuras inundaciones, debido a su localización en unidades expuestas al riesgo de inundación con altitudes <8 msnm y pendientes <0,5. El lecho menor del río Andalién perdió un 18,4% de su superficie. En la zona superior, el manejo del cauce disminuyó el riesgo para tasas de retorno de 2, 5 y 10 años; sin embargo para tasas de retorno de 500 años el riesgo se mantuvo en niveles altos pudiendo afectar a 39.283 personas y 10.570 viviendas.

Palabras Clave: Inundaciones fluviales, crecimiento urbano, HEC-RAS, LIDAR, río Andalién, riesgos naturales, desastres naturales

Introducción

Las inundaciones corresponden a un proceso natural en los sistemas fluviales (Lytle & Poff, 2004; Tockner *et al.*, 2010), sin embargo el hombre en ocasiones ha ocupado y urbanizado zonas inundables, ampliando las áreas de riesgo para los asentamientos humanos y las infraestructuras (Walsh *et al.*, 1994; Keller & Blodgett, 2007). Entre 1998-2008, se registraron más de 2.900 eventos a escala global (Adhikari *et al.*, 2010), que disminuyeron la calidad y el nivel de vida de la población afectando especialmente a ciudades de países en vías de desarrollo en sus zonas con creciente urbanización (Gaume *et al.*, 2009; Arman *et al.*, 2010; Djordjević *et al.*, 2011; Rahman & Nawaz, 2011; Singh & Singh, 2011).

La urbanización produce cambios bioquímicos y físicos en los sistemas hídricos (Miller *et al.*, 2014; Singh & Singh, 2011), cuyos efectos se ven reflejados en impermeabilización de los suelos y en una reducción de la infiltración de la cuenca, la cual provoca picos más altos en las inundaciones y descargas más rápidas (Suriya & Mudgal, 2012; Wheeler & Evans, 2009; Beighley *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2014). Además la adaptación de los terrenos para la urbanización puede confinar los sistemas fluviales, aumentando la frecuencia de las inundaciones al realizar un manejo inadecuado del cauce y de la planicie de inundación (Nirupama & Simonovic, 2007; Maaskant *et al.*, 2009; Ntelekos *et al.*, 2010). Lo anterior se traduce en poblaciones urbanas cada vez más vulnerables frente a este tipo de desastres (Sowmya *et al.*, 2014).

En las próximas décadas se prevé un escenario donde aumenta la frecuencia y magnitud de las inundaciones debido al crecimiento urbano y al cambio climático (Eissa & Zaqui, 2011; Broekx *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2014; Zope *et al.*, 2014). Se estima que al año 2050 las áreas urbanas concentrarán el 70% de la población mundial (Miller *et al.*, 2014), y gran parte de ella habitará en la zona costera, la cual es más susceptible a inundaciones, y en la actualidad concentra cerca del 50% de la población mundial (Broekx *et al.*, 2011; García & Loáiciga, 2014). En la costa, los principales factores que explican las inundaciones fluviales, corresponden a la intensidad y persistencia de la precipitación, débiles pendientes de los cursos fluviales en su desembocadura, los cambios en el nivel del mar y los cambios de uso de suelo, en especial debido a la urbanización (Mah *et al.*, 2011; Yin *et al.*, 2011; Eliot, 2012; García & Loáiciga, 2014).

Chile ha sido identificado como uno de los países en riesgo de aumento de inundaciones (Kundzewicz & Schellnhuber, 2004) debido a sus características geográficas: variedad climática zonal, relieves montañosos, cambios ambientales; y expansión urbana sobre las llanuras fluviales (Peña & Klohn, 1990; Rojas *et al.*, 2014). Por todo lo anterior, la ocurrencia de inundaciones parece ser más frecuente en los últimos años, coincidentemente en áreas donde la rápida urbanización tiene lugar (Romero & Vásquez, 2005; Müller, 2013). En el período 1900-2012, aproximadamente

57 inundaciones detonadas por peak de precipitación se produjeron en la zona mediterránea chilena (Rojas *et al.*, 2014), cuyos asentamientos superan los 11 millones de habitantes, concentrando el 73% de la población nacional y el 78% de la población urbana (INE, 2002) principalmente en las Áreas Metropolitanas de Santiago, Valparaíso y Concepción (AMC); estas dos últimas además localizadas en zonas costeras, siendo el AMC objeto de este estudio.

La sección inferior del río Andalién cubre parte del territorio del AMC y en los últimos 50 años (1955-2007) ha experimentado un crecimiento de la superficie urbanizada de un 700% (Mardones & Vidal 2001; Vidal & Romero 2010). La urbanización ha intervenido grandes tramos del cauce del río Andalién, con efectos ambientales variados en: biodiversidad, reducción de hábitat, deterioro de cubierta vegetal y anegamientos e inundaciones (Pauchard *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2009; Smith & Romero, 2009; Rojas & Plata, 2010; Salinas & Pérez, 2011; Rojas *et al.*, 2013). En particular, las inundaciones en la cuenca del Andalién son recurrentes, en el período 1960-2010 se registraron 21 eventos; de estos, 5 de elevada magnitud ocurrieron entre 2000-2010. Solo el costo del desastre del año 2005 a nivel regional fue de 6,5 millones de dólares, afectando la periferia y zona urbana consolidada de Concepción (Rojas & Mardones, 2013; Mardones *et al.*, 2004).

El presente estudio plantea que en la sección inferior del río Andalién, las transformaciones físicas del cauce fluvial y su entorno producidas por la expansión urbana, se han traducido en una modificación hidráulica del cauce y de las planicies de inundación; estos cambios se expresarían en una mayor magnitud de los efectos provocados por eventos de inundaciones fluviales. El estudio evalúa y zonifica en el curso inferior del río Andalién áreas de peligrosidad de inundación fluvial para tasas de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años, y determina cambios de usos del suelo por parte de la población en dichas zonas entre 1943-2011. Para ello se realiza (1) un análisis de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana, y (2) un análisis del aumento de los desastres fluviales.

Área de estudio

La cuenca del río Andalién (715 Km²), se localiza en la región del Biobío, Chile (Fig. 4.1) (36° S). La sección inferior representa el 4% de su superficie, sin embargo en ella reside el 90% de la población de la cuenca (90.000 habitantes); distribuidos en las comunas de Concepción y Talcahuano. La ocupación urbana en el AMC se caracteriza por tejidos dispersos y de baja densidad, especialmente en la periferia (Rojas *et al.*, 2011). Además en ambas comunas los índices de pobreza llegan al 14,6 y 17,6 respectivamente (MIDEPLAN, 2006).

La precipitación de la cuenca se concentra en un 70% en 4 meses invernales. Los montos anuales oscilan entre 1.200 mm en la sección inferior a 1.600 mm en la sección superior, debido al control orográfico (Devynck, 1970). Los episodios con cinco días de precipitación continua son habituales con 124 mm/24-h en junio de 1974 y 2006 (Peña

et al., 1993; Mardones *et al.*, 2004; Mardones y Vidal, 2001). El caudal promedio anual alcanza los $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en la estación de cierre de la cuenca, y llega a $565 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $634 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante una crecida de $T=50$ y años y $T=100$ respectivamente, con un tiempo de concentración de 10 a 12 h (Arrau Ingeniería E.I.R.L., 2012). En su curso inferior el principal tributario corresponde al Estero Nonguén, por el que fluye regularmente un caudal medio de $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no obstante durante tormentas puede llegar a $83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para $T=100$ años (CONAMA, 2008).

La cuenca es predominantemente montañosa (los cordones graníticos ocupan más del 60% de la superficie). Las plataformas graníticas ocupan 20% de la superficie total, mientras que la menor cobertura la representan las llanuras y terrazas aluviales del curso inferior (Jaque, 1996; Hernández, 1999). Los cambios ambientales de este sistema se han traducido en una degradación del medio natural, debido a la sobreutilización agrícola y ganadera, tala del bosque nativo, sistemas de cultivos inadecuados, actividades forestales, incendios y quemas forestales, que implicaron un 18% de la cuenca fuera afectada por procesos erosivos, desde erosión en manto a extensas áreas de cárcavas (Jaque, 1996).

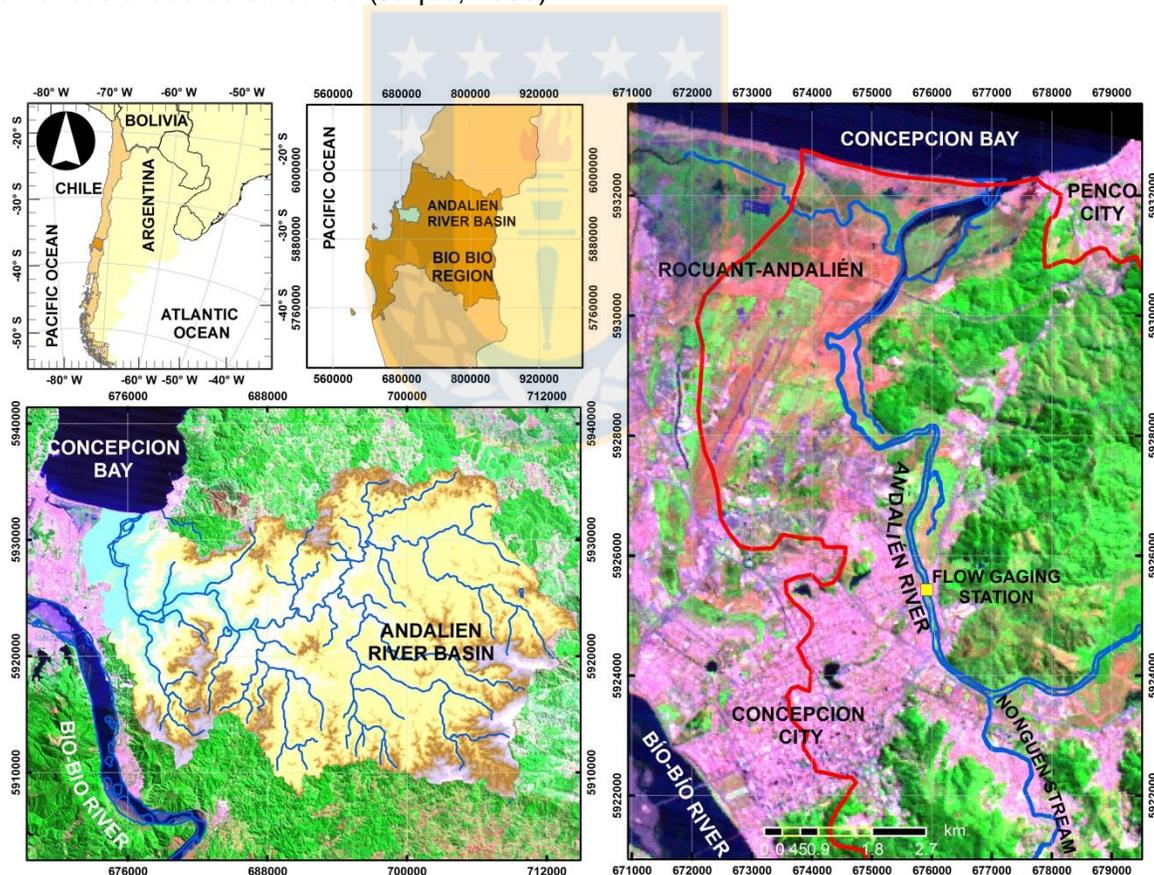


Fig. 4.1 Área de estudio. Línea roja indica límite de la cuenca.

Metodología

Análisis de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana

La geomorfología y la evolución de la superficie urbana del curso inferior de la cuenca, se obtuvo mediante interpretación de fotografías aéreas para períodos de tiempo de ≈11 años. Las fotografías aéreas correspondieron a los años 1943 (Trimetrogon - IGM, 1:40.000), 1955 (Hycon - IGM, 1:70.000), 1961 (OEA - IGM, 1:20.000), 1978 (SAF - IGM, 1:20.000), 1992 (SAF-FONDEF, 1:20.000), 1998 (GEOTEC, 1:70.000), 2011 (SAF, 1:30.000). Para la georreferenciación se utilizó instrumental GPS doble frecuencia Trimble modelo R-4 con vinculación geodésica. El procedimiento se realizó en ArcGIS 9.3 mediante transformaciones polinómicas de segundo orden. Se obtuvo la representatividad del píxel RDP (ec. 1, Tabla 4.1) y el Error Medio Cuadrático RMS (ec.2, Tabla 4.1) atribuido al proceso de rectificación geométrica de las imágenes (Araujo *et al.*, 2009).

$$RDP = \frac{2.54 \cdot 10^{-2} (m) \cdot Escala}{resolución(dpi)} \quad (ec. 1)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i' - X_i)^2 + (Y_i' - Y_i)^2}{N}} \quad (ec. 2)$$

Para la elaboración de la carta geomorfológica se utilizó como base el croquis geomorfológico de Ilabaca (1989) y la carta geológica de CIER-SERPLAC (1977). La identificación y clasificación de formas de detalle y actualización de los cambios geomorfológicos y urbanos recientes se realizaron en dos campañas de terreno apoyadas con instrumental GPS y fotografías aéreas del año 2011. Se obtuvieron dos cartas geomorfológicas, la primera representó la situación de referencia del año 1943, y la segunda la evolución de la superficie urbana y los cambios geomorfológicos recientes.

Tabla 4.1 Representatividad del Píxel (RDP) y error medio cuadrático (RMS)

Año	Escala	Puntos de control	DPI	Rep. Pixel (m)	RMS
1943	40.000	14	1.200	0,85	1,57
1955	70.000	20	1.200	1,48	2,26
1961	20.000	17	1.200	0,42	1,50
1978	30.000	15	1.200	0,64	1,60
1992	20.000	16	1.200	0,42	2,16
1998	70.000	12	2.400	0,74	0,24
2011	30.000	26	1.200	0,64	1,31

El análisis de relación con la urbanización se realizó mediante la detección de la superficie urbana en el periodo 1943-2011, la cual fue contrastada con la pérdida de naturalidad de las diferentes unidades geomorfológicas en el curso inferior de la cuenca. Los cambios de la red hídrica se evaluaron considerando longitud y superficie del cauce (Schumm, 1977). Para ello la sección inferior de la cuenca fue dividida en tres

tramos según sus características físicas: el tramo 1 comprendió desde la desembocadura hasta el Km. 6,2, representando un sector de estuario y transición; el tramo 2 comprendió entre los 6,2-15 Km la cual presentó características típicas de río (en este segmento se ha concentrado la urbanización); por último el tramo 3, correspondió al estero Nonguén. Para evaluar las tendencias se utilizó la prueba de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) y el estimador de Sen's (Sen, 1968)

Análisis de los desastres fluviales

El Riesgo Total (R_T) de inundación se evaluó considerando datos de los años 2002 y 2011 y se definió según el modelo propuesto por Rojas & Martínez (2011), que considera la interacción de tres factores (ec. 3); Amenaza (HR), Recurrencia histórica (RH) y vulnerabilidad (V_T). En este modelo la recurrencia histórica se entiende como un factor validador del análisis de amenaza, pues representa la historia significativa del peligro en el área a nivel temporal y espacial. Se expresa matemáticamente como:

$$R_T = (HR(RH)) * V_T \text{ (ec. 3)}$$

La amenaza de inundación (HR) se definió en función de la probabilidad de daño para los seres humanos utilizando la velocidad y la profundidad del flujo (ec. 4). La cartografía de amenaza fue construida para los períodos de retorno (T) de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años. La amenaza fue calculada en formato ráster según la expresión de *Environment Agency Flood & Coastal Defence London* (DEFRA, 2006):

$$HR = h(v + 0.5) + df \text{ (ec. 4)}$$

Donde h correspondió a la altura de la inundación (m), v velocidad (m/s) y df factor de escombros (0-1 puntaje). El nivel de peligrosidad para las personas es bajo si $HR < 0,75$, moderado si $0,75 < HR < 1,5$, alto si $1,5 < HR < 2,5$, y extremo si $HR > 2,5$.

La velocidad y profundidad del flujo fue calculada mediante modelación hidráulica en una-dimensión (1D) con el software *HEC River Analysis System Hec-Ras 4.1* desarrollado por *US Army Corps of Engineers* (Brunner, 2010). Los datos de caudal para las diferentes Tasas de Retorno se obtuvieron de Arrau Ingeniería E.I.R.L. (2012). La condición de borde aguas abajo más crítica, se obtuvo de los registros del mareógrafo del Puerto de Talcahuano y de las Tablas de Marea proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para días en que se produjeron eventos de inundación en la cuenca. Se definió una condición de borde aguas abajo de 1,97 m.

Para la obtención de los datos geométricos de la sección inferior se realizó un levantamiento topo-batimétrico post-terremoto 2010 Mw=8,8. La topografía se completó mediante dos vuelos LIDAR, el primero de ellos con una resolución de 2,5m (Centro de Investigación Marítimo Portuario CIMP); mientras que la zona más próxima al cauce se completó con un vuelo de resolución 1m (Dirección de Obras Hidráulicas).

Debido a los problemas que poseen los vuelos LIDAR para penetrar bajo la lámina de agua, la batimetría se construyó a partir de dos fuentes de datos: desde la desembocadura hasta el Km. 4, a través de ecosonda GARMIN modelo FF400C cuyo transductor fue instalado al costado de un bote pesquero, apoyada mediante GPS doble frecuencia marca TRIMBLE modelo R-4, vinculado a vértices geodésicos. Desde el 4 Km hasta el 12 Km, considerando la baja profundidad, se realizó una corrección del lecho del cauce por criterios de pendiente según lo establecido por Arrau Ingeniería E.I.R.L. (2012). El sistema de coordenadas utilizado correspondió a WGS_1984_UTM_Zone 18 S, los datos de altitud fueron referidos al NMM.

Una vez corregidos los datos LIDAR se generó un DEM (*Digital Elevation Model*) en formato GRID, a partir del cual se elaboraron 272 perfiles trasversales mediante HECgeo-RAS 4.3.1 extensión de ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009). Cada perfil tuvo una equidistancia variable entre 50-100 m según las condiciones de topografía local. Para el canal y la llanura de inundación en cada sección fue ingresado el coeficiente de rugosidad de Manning's (n) (Barnes, 1967), obtenido por observación y fotografías georreferenciadas en campo. El coeficiente fue calibrado mediante los trabajos de Inostroza (2005) y Rojas (2015). La validación del modelo de peligro se realizó con la inundación del año 2006, datos de entrevistas obtenidas en terreno (Fig. 4.2), fotografías aéreas y datos de prensa recopilados por Rojas & Mardones (2013).



Fig. 4.2 Entrevista Sra. Adelina Varela (Sector General Bonilla).

La vulnerabilidad total (V_T) se refirió espacialmente a la localización de elementos expuestos y vulnerables y a las deficiencias de sus estructuras para absorber o recuperarse de una inundación (Rojas & Martínez, 2011). Se definieron 6 capas

temáticas o variables de interés (Tabla 4.2) en formato ráster (1m x 1m). Para las variables 1-5 se utilizó la información demográfica a nivel de manzana correspondiente al censo 2002 (Instituto Nacional de Estadísticas) la información relativa a los usos de suelos se obtuvo de GESITRAN (2014) y CONAF (2008). Los puntajes de vulnerabilidad fueron determinados en escala de 0-10 (Sowmya *et al.*, 2014). Las clases de las variables 1-4 fueron normalizadas según la metodología de Müller (2013) (ec. 5). Las clases de la variable 5 se establecieron según Rojas 2010 y Mardones & Vidal (2001), mientras que la variable 6 fue adaptada de Tanavud *et al.* (2004).

Tabla 4.2 Elementos vulnerables

Factor	Capas temáticas	Peso (%)	Clases individuales	Puntaje/rango
Exposición	N° de habitantes/manzana	0.23	0-221 222-525 526-718 719-975 976-2184	0-2 3-4 5-6 7-8 9-10
Exposición	N° de viviendas/manzana	0.14	0-119 118-217 218-314 315-412 412-489	0-2 3-4 5-6 7-8 9-10
Vulnerabilidad	Población > de 65 años/manzana	0.17	0-31 32-57 58-82 83-107 108-127	0-2 3-4 5-6 7-8 9-10
Vulnerabilidad	Población discapacitada/manzana	0.11	0-16 17-30 31-44 45-57 58-68	0-2 3-4 5-6 7-8 9-10
Vulnerabilidad	Material de construcción predominante	0.18	Hormigón, Acero Albañilería Mixta Madera, Tabique Desechos	2 4 6 8 10
Vulnerabilidad	Uso del suelo predominante	0.17	Cuerpos de agua Pantanos y arbustos Agrícola Áreas de servicios públicos e instalaciones (parques, almacenaje recreativo) Áreas institucionales y de gobierno (salud, educación) Residencial, comercial, industrial	0 2 4 6 8 10

Fuente: Elaboración propia

Las capas temáticas se integraron por evaluación multicriterio (EMC). Los pesos relativos de cada capa, fueron establecidos mediante encuesta a 10 expertos utilizando el método de Delphi y una escala de 1-9. Para determinar el grado de asociación de las

evaluaciones otorgadas por los expertos se aplicó el coeficiente de Concordancia W de Kendall ($\alpha = 0.05$). Se obtuvo un valor $W = 0.55$ que indica que los expertos aplicaron los mismos estándares para asignar rangos a los ítem ($p = 0.003$). Posteriormente se construyó una matriz normalizada, que permitió obtener mediante un promedio lineal el vector propio asociado a cada capa temática. La integración de las capas se realizó utilizando la Weighted Overlay de la extensión Spatial Analyst Tools de ArcGIS 9.3 a través de la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ de habitantes normalizado (NHN)} = 10 \times \frac{NH_{manz}}{NH_{manzmax}} \quad (\text{ec. 5})$$

$$V_T = (F1 \times W1) + (F2 \times W2) + \dots + (Fn \times Wn) \quad (\text{ec. 6})$$

Donde F representa cada factor de la puntuación reclasificada de vulnerabilidad (Puntaje de vulnerabilidad), W (peso relativo) es la puntuación relativa según su peso de influencia.

La vulnerabilidad total fue reclasificada en cinco rangos: muy baja (1), baja (2), moderada (3), alta (4) y extrema (5). El riesgo total para cada tasa de retorno (R_T) fue medido de acuerdo a los factores de amenaza y vulnerabilidad integrados en una matriz. De la multiplicación se obtuvieron 4 niveles de riesgo: bajo, moderado, alto y extremo (Tabla 4.3) con puntajes de 1-20.

Tabla 4.3 Matriz de riesgo por inundación fluvial

X		Peligro				
		Nivel	Bajo	Moderado	Alto	Extremo
Vulnerabilidad	Puntaje		1	2	3	4
	Muy baja	1	1	2	3	4
	Baja	2	2	4	6	8
	Moderada	3	3	6	9	12
	Alta	4	4	8	12	16
	Extrema	5	5	10	15	20

Fuente: Elaboración propia. Rango de riesgo: Bajo (1-3), Moderado (4-6), alto (8-10), extremo (12-20).

Resultados

Análisis de las transformaciones físicas y su relación con la expansión urbana

La Fig. 4.3 muestra la geomorfología y la superficie ocupada por la ciudad de Concepción en el año 1943. Al interior de ésta, la sección inferior de la cuenca del río Andalién ocupó 13.597 ha. Los relieves de erosión representaron un 69,5% del área, constituidos por: Cordones de erosión hídrica de la Cordillera de la Costa conformados por granito Paleozoico representan el 62,7% del relieve del sector, un 6,5% corresponden a plataformas de erosión marina del Eoceno y fines del Plioceno, todos estos relieves con altitudes superiores a 20 m.s.n.m.

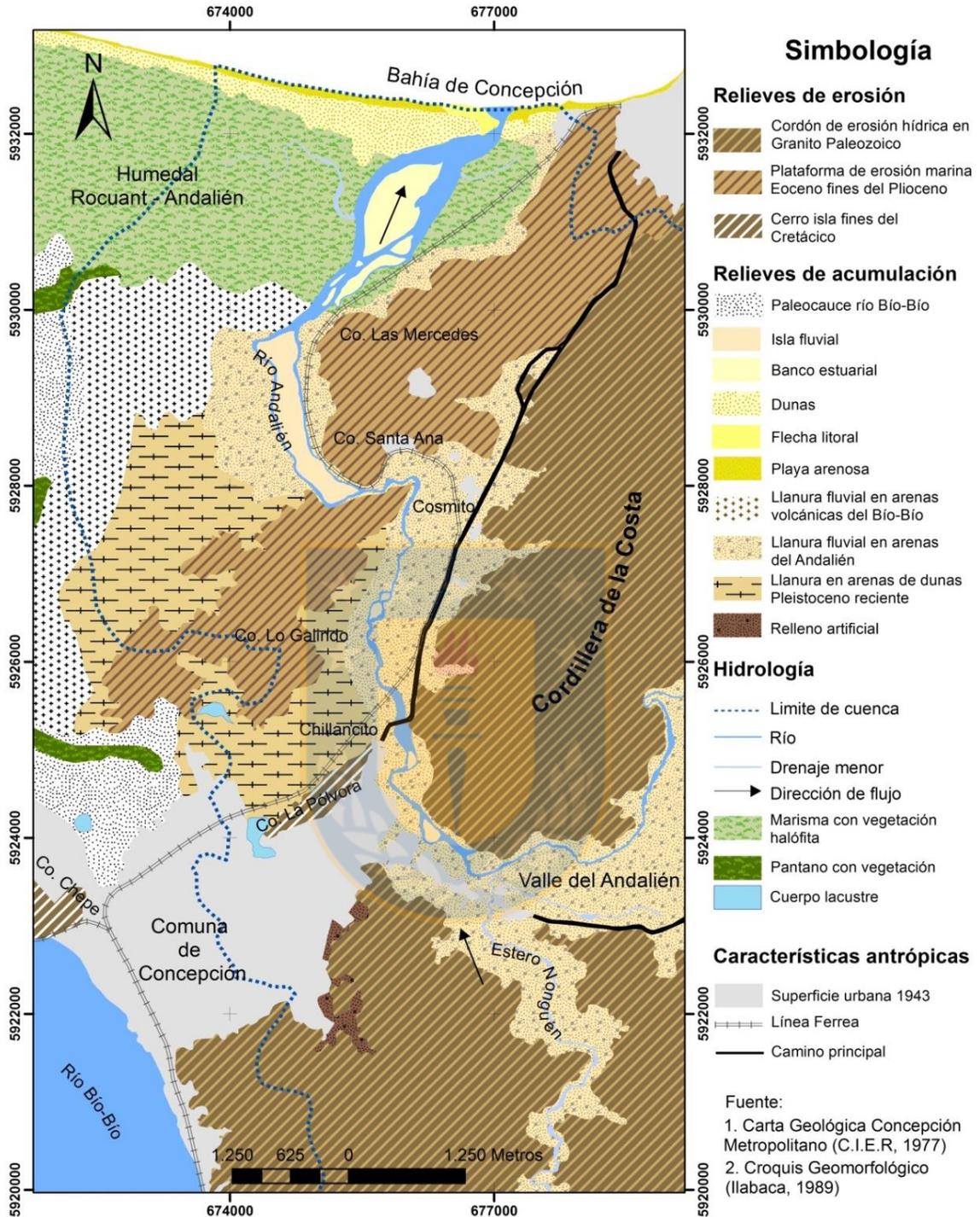


Fig. 4.3 Geomorfología del sitio de emplazamiento de la ciudad de Concepción y de la sección inferior de la cuenca del río Andalién. Superficie urbana, año 1943.

Los principales relieves de acumulación se localizaron próximos al río y al litoral y correspondieron: en un 12,4% a la llanura de arenas cuarcíferas del río Andalién, un 6,72% a la llanura de arenas negras basálticas del río Biobío del Pleistoceno reciente-Holoceno temprano, y a la unidad de la llanura que fue modelada en dunas; finalmente

un 5,5% de unidades hidromorfas que correspondieron a: marismas, cuerpos lacustres y cauces.

De estas unidades la llanura de arenas cuarcíferas del río Andalién forma parte del lecho mayor y planicies aluviales de inundación ocasional del río Andalién; se encuentra formada por una mezcla de arenas finas, limos y arcillas en algunos casos asociada material coluvial con un espesor aproximado de 3 m; estos materiales presentan una permeabilidad moderada, y grandes oscilaciones en su nivel freático; en verano la napa desciende a 3 m y en invierno la podemos encontrar muy cerca de la superficie o en superficie (Mardones, 1978).

Una vista aérea general del área de estudio al año 2011 (Fig. 4.4), mostró modificaciones geomorfológicas significativas en el área de estudio, producidas por la expansión urbana. La ciudad ha ocupado un 4% (565 ha) de la superficie de los relieves de erosión, que corresponden principalmente al cordón de erosión hídrica de la Cordillera de la Costa -339 ha y plataformas de erosión marina -196 ha. Los relieves de acumulación fueron ocupados en un 6,4% (872 ha) por urbanización, principalmente unidades expuestas a inundaciones por su baja altitud <8 msnm como el sistema de llanura fluvial en arenas cuarcíferas del río Andalién -497 ha, llanura en arenas de dunas -321 ha y llanura fluvial en arenas negras basálticas del río Biobío -54 ha (Tabla 4.4). Por su parte la ciudad aumentó su superficie en 1.427,6 ha en los últimos 68 años.

Otras modificaciones constatadas al 2011 muestran el incremento de las zonas de relleno artificial destinadas para la futura expansión urbana en 41,5 ha; localizados sobre la llanura de arenas cuarcíferas del río Andalién 0,7 Km aguas arriba de la confluencia con el estero Nonguén y a 0,8 Km al E del aeropuerto Carriel Sur. Además se constató el incremento de zonas con diques de tierra, debido a la profundización y rectificación del cauce que se realizó entre 7-15 km; y que se extenderán hasta el 3,2 km desde la desembocadura (CONAMA, 2008).

Tabla 4.4 Variación de la superficie (ha) de las unidades geomorfológicas principalmente por efecto de la urbanización, periodo 1943-2011

Unidades/año	1943	2011	Dif.	Unidades/año	1943	2011	Dif.
Superficie Urbana	408,1	1.865,8	1.457,6	Flecha. Litoral	9,5	6,0	-3,6
Relleno artificial	74,3	115,8	41,5	Isla. F	64,3	56,9	-7,4
Marisma	548,3	576,6	28,3	Cerro Isla	34,2	4,1	-30,1
Banco Estuarial	65,2	83,7	18,5	Cauces	182,5	151,1	-31,4
Pantano	7,2	9,0	1,8	Ll. Fluv. A. Biobío	364,2	309,9	-54,4
Dunas	117,7	118,6	0,9	Plat. Eros. Mar	882,3	686,0	-196,3
Playa. Arenosa	28,5	28,3	-0,2	Cord. Eros. Hid	8.528,7	8.189,6	-339,1
Paleocauce Biobío	25,0	24,4	-0,6	Ll. A. Dunas*	547,7	196,9	-350,8
Cuerpos Lacustres	13,3	12,4	-0,8	Ll. Fluv A. Andalién*	1.696,6	1.157,8	-538,8

Fuente: Elaboración propia. * Presentan una disminución mayor por el incremento de áreas de marisma y zonas con relleno artificial.

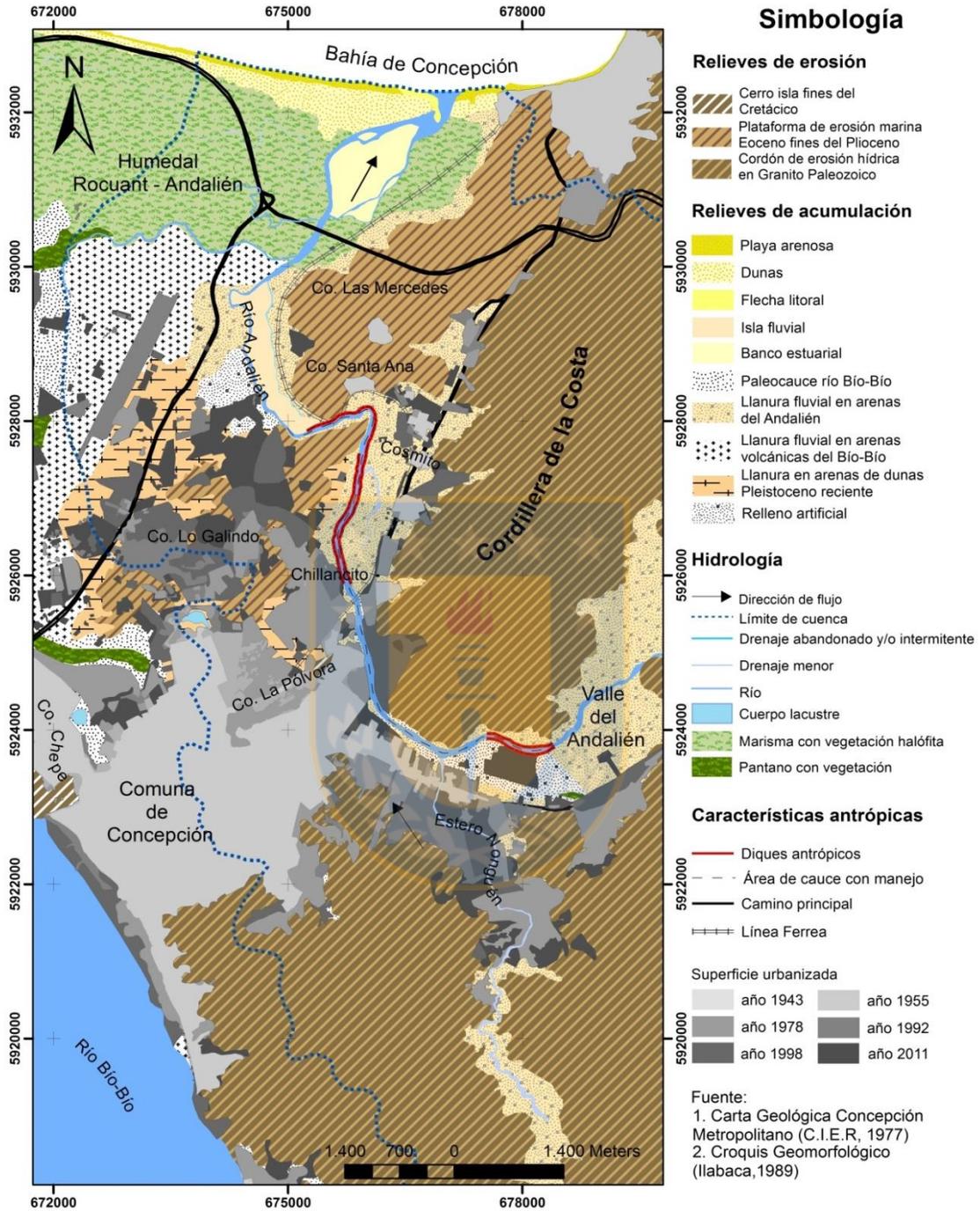


Fig. 4.4 Etapas de expansión de la ciudad de Concepción, sobre las unidades geomorfológicas de la sección inferior de la Cuenca del Andalién, periodo 1943-2011.

El aumento de la superficie urbana en la sección inferior del río Andalién ha implicado una modificación de la red hídrica y un incremento progresivo de la exposición frente al peligro de inundación fluvial. En 1943 la superficie de Concepción alcanzaba a 408 ha,

en 1978 llegó a 1055 ha, para 2011 se había incrementado a 1.866 ha. La tendencia decadal muestra un incremento significativo ($p=0,001$). La mayor tasa de crecimiento urbano ocurrió entre 1961-1978 y 1992-1998 con 30,7 y 44,14 ha/año respectivamente. Desde 1998 a 2011 la tendencia anual de crecimiento disminuyó a 25,53 ha/año (Fig. 4.5).

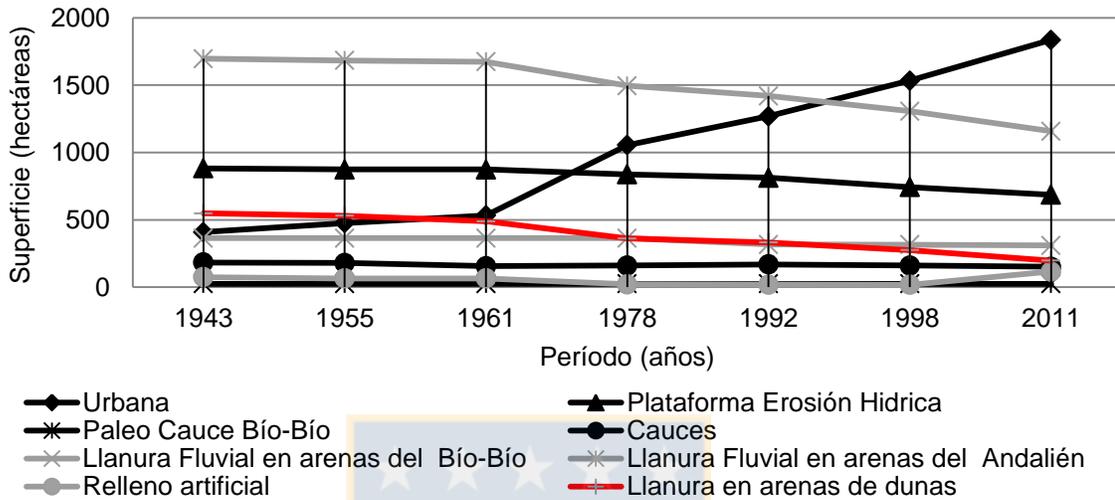


Fig. 4.5 Evolución de la superficie urbana y pérdida de la naturalidad de unidades geomorfológicas susceptibles a inundación fluvial 1943-2011

Además el crecimiento urbano ha implicado una modificación de la red hídrica. Entre 1943-2011 el río Andalién perdió un 18,4% de su lecho menor (Tabla 4.5). El análisis por tramo fluvial indicó que la pérdida se concentró en el tramo 1 (desembocadura – hasta 6,2 km) donde se redujo en 50,3 ha de cauce; por el contrario el tramo 2 (6,2-15 km) aumentó su superficie en 20,2 ha. El estero Nonguén ha presentado mayores ciclos de aumento o descenso de su superficie. En el período analizado la pérdida fue 1,2 ha.

Tabla 4.5 Evolución de la superficie (ha) de los principales cursos hídricos en el curso inferior de la cuenca 1943-2011

	S_Tramo 1	S_Tramo 2	S_Total_ &	S_Nonguén	Total
1943	106,9	57,3	164,2	18,3	182,5
1955	112,1	53,2	165,3	13,5	178,8
1961	101,5	41,3	142,8	13,5	156,3
1978	91,7	60,3	152,0	10,9	162,9
1992	99,7	59,8	159,6	10,9	170,4
1998	86,8	68,6	155,4	15,6	171,0
2011	56,6	77,5	134,0	17,1	151,1

Nota: Números en negrita indican cifra máxima y mínima por cada tramo de la red hídrica analizada.

El análisis de tendencias muestra que la longitud total del río ha decrecido (Tabla 4.6) a un ritmo de -0,134 Km/década ($p=0,05$), tendencia similar a lo observado en el estero Nonguén -0,036 Km/década ($p=0,1$). La disminución fue altamente significativa en el

tramo 2 -0.294 Km/década ($p=0,01$), mientras que en el tramo 1 la tendencia fue creciente +0,152 Km/década ($p=0,05$). Las tendencias en longitud fueron coherentes con la evolución de las superficies aquí reportadas.

Tabla 4.6 Test de Mann-Kendall evolución de la red hídrica

Parámetro	p-value	Trend			p-value	Trend	
Longitud total Andalién	*	-0,134	↓	Superficie Tramo 1-Andalién	*	-6,324	↓
Longitud Tramo 1-Andalién	*	0,152	↑	Superficie Tramo 2-Andalién	+	3,864	↑
Longitud Tramo 2-Andalién	**	-0,294	↓	Superficie Total Andalién		-2,460	↓
Longitud Total Nonguén	+	-0,036	↓	Superficie Total Nonguén		0,000	
Longitud total	+	-0,196	↓	Superficie Total		-3,008	↓

Nota: Nivel de significancia: +0,1; *0,05; **0,01; ***0,001. Fechas: ↓ indica tendencia decreciente; ↑ indica tendencia creciente.

Análisis de los desastres fluviales

En la sección inferior de la cuenca del Andalién han ocurrido 21 eventos de inundaciones entre 1960-2010, el número de barrios afectados y la magnitud de los eventos se incrementaron bruscamente durante en el período 2000-2012; así por ejemplo el promedio de barrios afectados subió de 2,0 a 5,5 en el período señalado (Rojas, 2015). El análisis de riesgo realizado mostró que las áreas de peligro aumentaron en un 286% entre los escenarios correspondientes a tasas de retorno (T) entre 2 y 500 años (Fig. 4.6).

Al cotejar las Figuras N° 4.3 y 4.6, se deduce que los modelados principalmente afectados por las inundaciones, correspondieron a la llanura del río Andalién, llanura deltaica del Biobío, áreas de marismas, sectores de dunas, islas fluviales y bancos estuariales. El nivel de peligrosidad analizado por tasas de retorno, presentó una peligrosidad baja en T=2, T=5 y T=10 años, mientras que para las T=200 y T=500 el nivel de peligro aumentó de forma considerable.

Para tasas de retorno de 2, 5 y 10 años los desbordes se concentraron desde la desembocadura hasta el 10,2 Km del cauce, correspondiente a áreas con baja urbanización; en la zona superior ocurrieron desbordes aislados (Fig. 4.6). Las zonas inundadas alcanzaron a 695 ha en T=2 y 863 ha (Fig. 7) en T=10; la velocidad máxima del flujo y profundidad en las planicies de inundación llegó a 0,65 m/s y 2,5 m respectivamente. Para una T=25 los desbordes se extendieron a la zona superior con mayor urbanización correspondiente a algunas zonas del estero Nonguén y Andalién antes de la confluencia con el mencionado estero alcanzando una superficie inundada de 1.083 ha, en estas áreas se alcanzaron velocidades de 0,35 m/s y profundidades de ≈ 1 m.

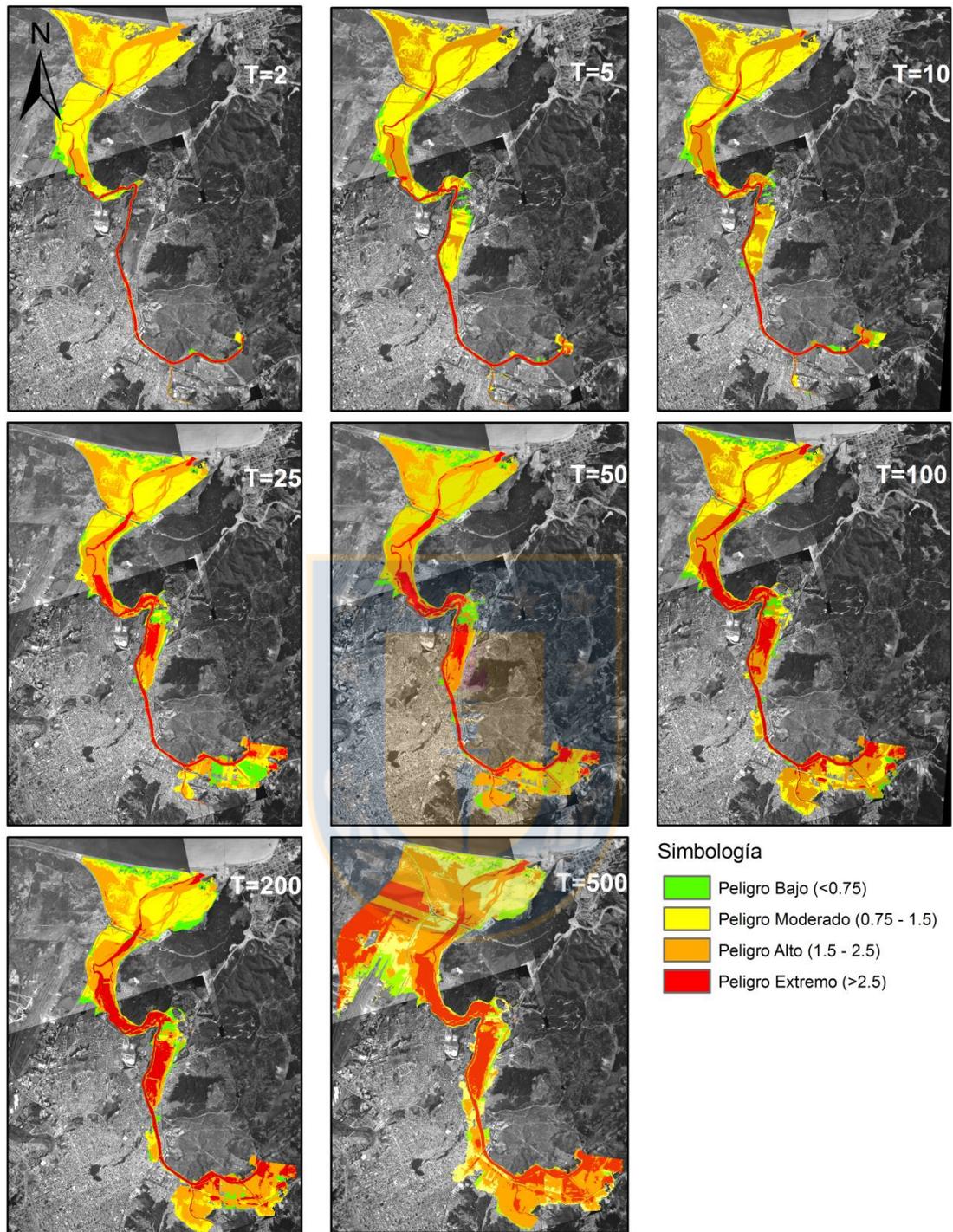


Fig. 4.6 Peligro de inundación para diferentes tasas de retorno en la sección inferior de la cuenca del río Andalién

Para una T=50 y T=100 los zonas de fallas del cauce son similares a las reportadas en T=25, pero con una extensión de inundación mayor (1.143 ha y 1.243 ha respectivamente), las velocidades y profundidades máximas en zonas con mayor urbanización correspondieron a 0,53 m/s y 1,5 m. Para los eventos extremos T=200 y

T=500 las zonas con desborde aumentaron significativamente en zonas urbanas alcanzando las 1985 ha inundadas en T=500, la velocidad máxima y profundidad del flujo en las planicies de inundación alcanzó los 0,55 m/s y $\approx 2,1$ m.

La Fig. 4.7 muestra la evolución de los niveles de peligro en ha para diversas tasas de retorno. El nivel de peligro bajo se mantuvo estable hasta T=10, desde T=10 a T=500 experimentó un crecimiento del 370%. Las zonas con peligrosidad moderada se mantuvieron estables en el período en torno a las ≈ 400 ha. La superficie inundada en niveles de peligrosidad alta y extrema aumentaron en forma significativa comparando T=2 y T=500 en un 373% y un 1096% respectivamente.

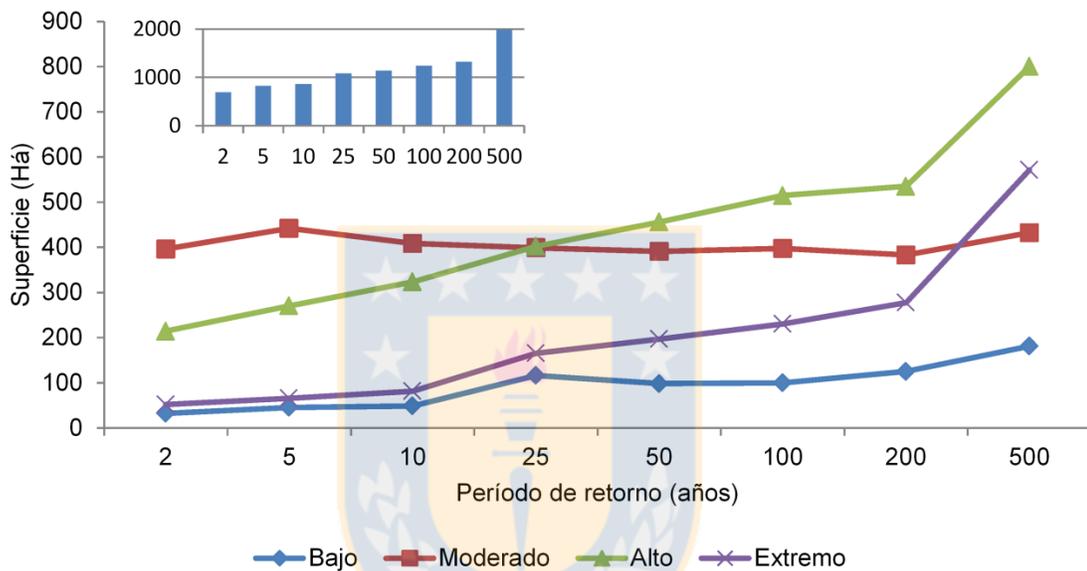


Fig. 4.7 Superficie inundada (ha) según niveles de peligrosidad y tasas de retorno

También se observaron cambios en relación al porcentaje de superficies inundadas según uso de suelo y tasa de retorno (Fig. 4.8). Para T=2, T=5 y T=10 el porcentaje de áreas no urbanizadas inundadas representó un $\approx 97,3\%$, y las zonas urbanas llegaron al $\approx 2,6\%$ de superficie inundada. En T=25 y T=50 la superficies inundadas no urbanizadas alcanzaron el $\approx 89\%$ y las zonas urbanas llegaron al $\approx 11\%$. En eventos extremos T=100 a T=500 las primeras disminuyeron al 80%, mientras que las segundas aumentaron al $\approx 20\%$. Aún más, dentro de la categoría de área urbanizada, fue la superficie destinada a usos residenciales, comerciales e industriales la más afectada y que pasó de 15 ha inundadas en T=2 a 374 ha en T=500, por su parte las áreas de servicios e institucionales se mantuvieron relativamente estables para los escenarios analizados.

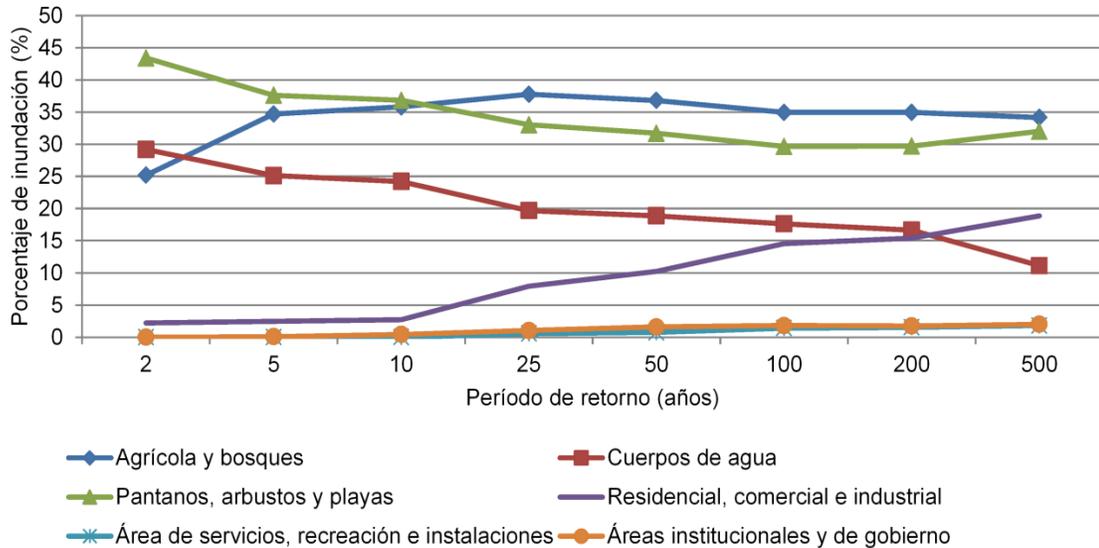


Fig. 4.8 Área de inundación (%) por clase de uso de suelo según períodos de retorno

Se encontraron las 5 categorías de vulnerabilidad total en 3.130 ha. El 55% de la superficie presentó vulnerabilidad muy baja, que correspondió a sectores sin uso urbano como humedales, sitios eriazos y de baja productividad (Fig.4.9). Un 17% quedó representado por áreas de baja vulnerabilidad, en esta categoría se encuentran recintos e instalaciones deportivas y la red vial. Las categorías de moderada, alta y muy alta vulnerabilidad representaron el 21%, 5% y 2% respectivamente, todos emplazados en sectores urbanizados.

El nivel de riesgo aumentó en relación directa con la tasa de retorno (Fig. 4.10). Para T=2, T=5 y T=10 se calculó que en el 88% del área el nivel del riesgo fue bajo, el 8% estuvo expuesta a riesgo moderado y un 4% a riesgo alto y extremo. En los niveles intermedios T=25 y T=50 la superficie en riesgo bajo y moderado fue de 72% y 13% respectivamente, mientras que el nivel alto y extremo ascendió al 15%. Para los eventos extremos entre T=100 y T=500 los niveles de riesgo fueron de un 52%, 28% y 20% para las categorías baja, moderada y alto-extremo respectivamente.

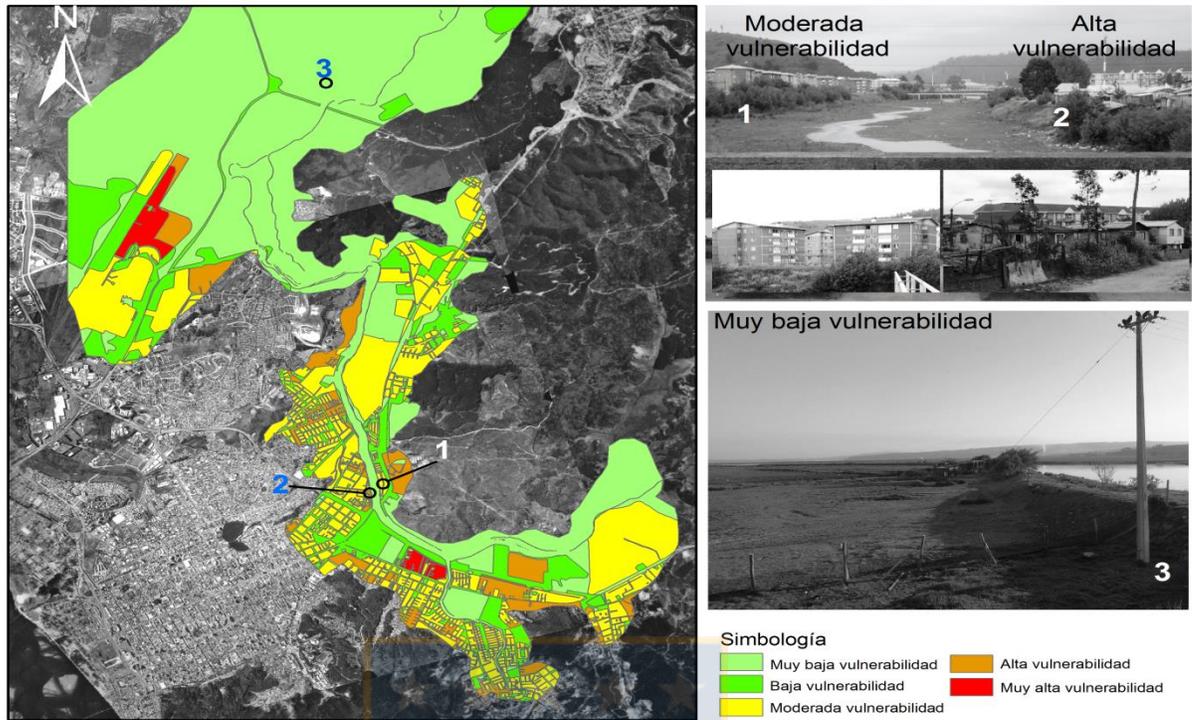


Fig. 4.9 Vulnerabilidad total en la sección inferior de la cuenca

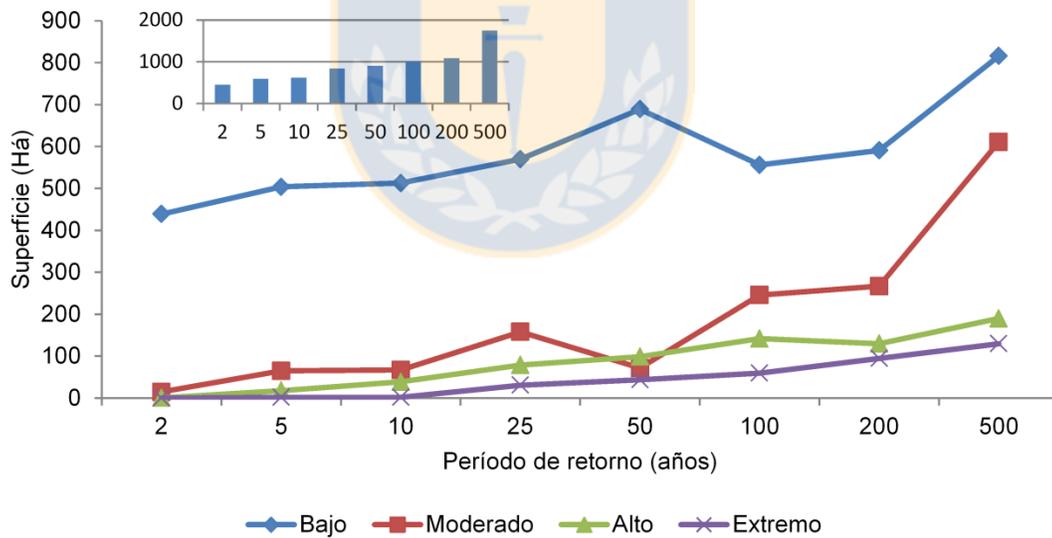


Fig. 4.10 Superficie de riesgo (ha) según niveles y tasas de retorno

El riesgo moderado, alto y extremo se concentró en zonas urbanas para las diferentes tasas de retorno (Fig. 4.11). La población en riesgo para una inundación con una T=2 años equivale a 1.903 personas, que residen en 901 viviendas, donde 91 personas son mayores de 65 años y 25 son discapacitados (Tabla 4.7). Para el evento más extremo evaluado T=500 más de 10 mil viviendas y ≈40 mil personas pueden resultar

inundadas, de ellas 2.469 correspondieron a población mayor de 65 años y 393 a discapacitados.

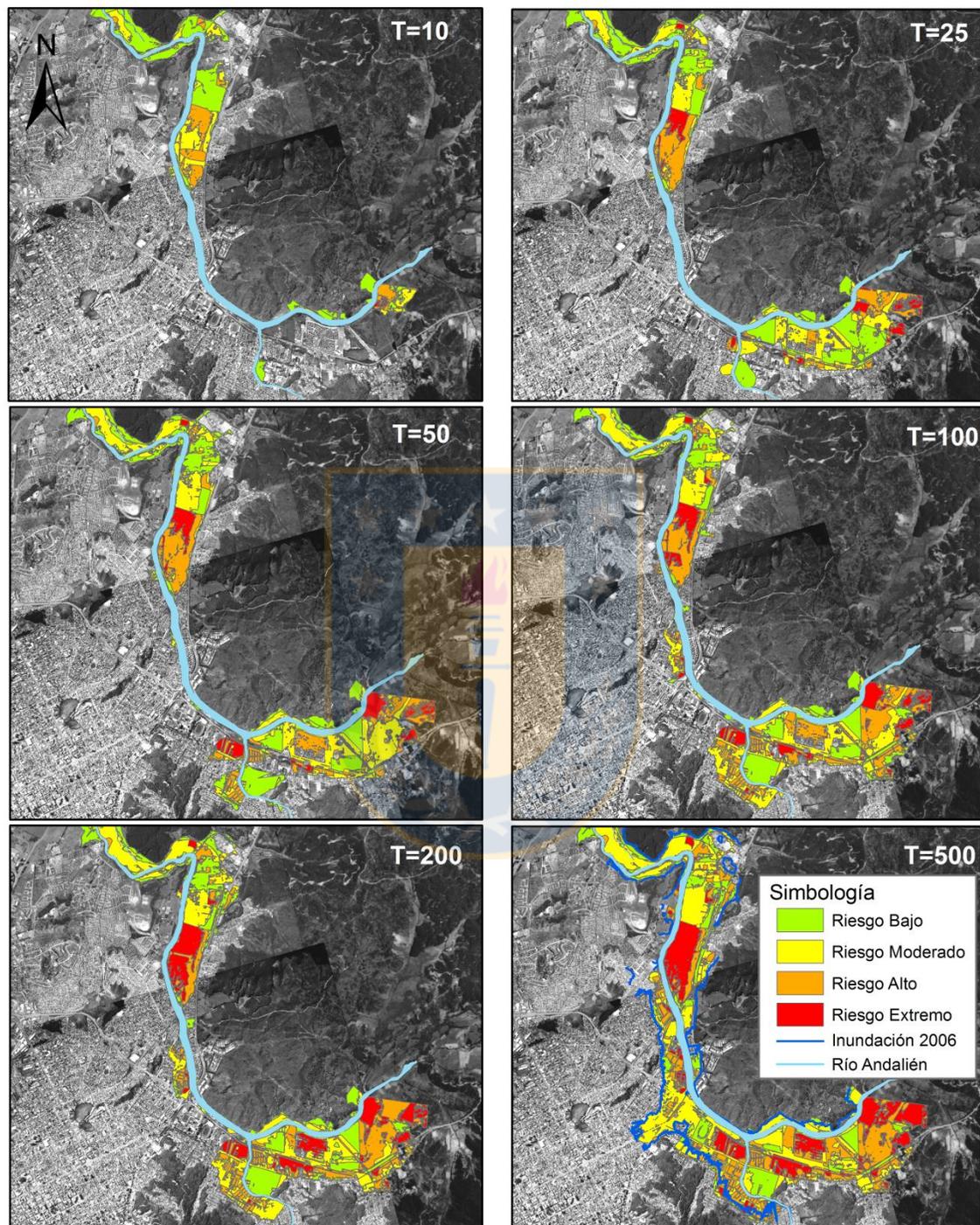


Fig. 4.11 Riesgo de inundación para diferentes tasas de retorno. En T=500 se indica límite máximo alcanzado por la gran inundación del año 2006.

Tabla 4.7 Población y viviendas afectadas según cada tasa de retorno

Tasa de retorno	N° de habitantes	N° de viviendas	Población > 65 años	Población discapacitada
T2	1.903	901	91	25
T5	3.687	1.412	240	49
T10	5.505	1.883	312	68
T25	9.722	2.997	442	119
T50	15.780	4.658	838	192
T100	23.240	6.306	1.343	363
T200	24.898	7.101	1.425	393
T500	39.283	10.570	2.469	717

Discusión

En el AMC la superficie urbana en la sección inferior de la cuenca del Andalién se incrementó en 1.458 ha en los últimos 68 años; este aumento es característico de las zonas costeras que han llegado a concentrar el 50% de la población mundial (Bárcena *et al.*, 2012; García & Loáiciga, 2014). La ciudad ha utilizado para la expansión urbana un 6.4% (872 ha) de la superficie de relieves de acumulación, expuestos a inundaciones, de estos, 497 ha se ubican en la llanura fluvial del río Andalién. Estos relieves, como señalaron Mardones & Vidal (2001) registran las mayores tasas de peligrosidad al riesgo de inundación en la ciudad de Concepción, debido a sus altitudes <8 m.s.n.m y pendientes inferiores a 0,5°.

La ocupación en zonas con mayor peligro de inundación en la cuenca, explicarían el aumento de barrios afectados por los eventos de inundación, que según Rojas (2015) subió en promedio de 2 por década entre 1960-1999 a 5,5 entre 2000-2012. Nuestros resultados son consistentes con lo que ocurre a nivel global, donde los daños por inundaciones urbanas son cada vez más intensos, costosos y difíciles de manejar (Jha *et al.*, 2011). En el mundo las pérdidas económicas debido a las inundaciones en los últimos diez años son diez veces más altos que en la década de 1960 después de realizado un ajuste por inflación (Berz, 2000). Similares resultados se han obtenido en Europa, donde el estudio de las inundaciones en el periodo 1970-2005, mostró que los años 2000 y 2002 registran las peores inundaciones de los últimos 36 años, en relación a los daños producidos (Barredo, 2007).

Sin embargo, la expansión de las ciudades, forma parte del desarrollo; el problema se produce debido a la rapidez del proceso de urbanización, que eleva la vulnerabilidad y aumenta la exposición al riesgo debido a la ocupación de las llanuras de inundación (Barredo, 2007; Ghani *et al.*, 2012; Sowmya *et al.*, 2014; Wei & Ye, 2014). Por ejemplo, Singh & Singh (2011) en Noida (India) determinaron que el desarrollo urbano en la última mitad del siglo XX en 189 sectores; ha aumentado las inundaciones pequeñas en un 200%; señalan como posibles causas la ampliación de las zonas de expuestas así como cambios en los índices de escorrentía.

La modelación hidráulica realizada mostró relativa estabilidad en relación a los desbordes que se producen en tasas de retorno de 2, 5 y 10 años, las fallas se concentraron en zonas con baja urbanización, correspondientes al 100% del tramo 1 (desembocadura- Km 6,2) y parte del tramo 2. La concentración de daños en el tramo 1 puede ser explicada por la pérdida de la superficie del lecho menor en 50,3 ha en el período analizado. Por su parte los menores desbordes en el tramo 2 del río, pueden ser relacionados con el incremento de la superficie del lecho menor en 20,2 ha, que se explica por las obras de ensanchamiento, encauzamiento y profundización del cauce que han generado nuevas secciones del río Andalién y del estero Nonguén según Resolución Exenta N° 267 (CONAMA, 2008).

El manejo del cauce ha sido positivo para las tasas de retorno señaladas; en general se conoce que un adecuado manejo del cauce orientado a rellenar y a elevar el nivel topográfico de las riberas puede ser positivo para disminuir el riesgo de inundación como ocurrió en la ribera norte del Río Biobío al SO de la ciudad de Concepción (Mardones & Vidal, 2001). Sin embargo es posible que zonas no urbanizadas en la actualidad sean destinadas para fines habitacionales, si ello ocurre, es probable que las altas inversiones para controlar las inundaciones no sean suficientes, y nuevas zonas de riesgo reaparezcan o aumenten debido a la expansión de las urbes como ocurrió en el río Mississippi (White, 1958, citado por Aneas, 2000). En parte, ya existen cerca de la zona de inundación proyectos inmobiliarios consistente en viviendas unifamiliares desde U\$100.000. Dichas áreas son potencialmente inundables desde las tasas de retorno de 100 años y pueden afectar a más de 23 mil personas.

Al respecto, Hattermann *et al.* (2013) señalaron que el desarrollo de zonas bajas se ha transformado en un factor importante en el incremento del riesgo de inundación al eliminar las llanuras de inundación como ha ocurrido en el Andalién. Sin embargo la magnitud del impacto se puede reducir mediante el desarrollo adecuado de medidas de mitigación y gestión de las inundaciones (Aneas, 2000; Zope *et al.*, 2014; Wei & Ye, 2014). La experiencia demuestra que solo el enfoque estructural (e.g. gaviones, canalizaciones) es insuficiente. El enfoque no estructural (e.g. protección de áreas ribereñas, mapas de inundación y riesgo) se ha identificado como un buen instrumento para urbanistas y diseñadores de políticas para determinar el grado de impacto de una inundación y generar una reducción efectiva de los daños (Merz *et al.*, 2010; Masood & Takeuchi, 2012; Kadam & Sen, 2012; Morelli *et al.*, 2014; Zope *et al.*, 2014).

Conclusiones

El aumento de la superficie urbana en 1,458 ha durante los últimos 68 años en la sección inferior del río Andalién ha implicado una modificación de la red hídrica y un incremento progresivo del peligro de inundación fluvial en unidades geomorfológicas susceptibles a estos procesos. La ciudad ha ocupado un 4% de la superficie de los

relieves de erosión, y un 6,4% de los relieves de acumulación. Los relieves de acumulación como: llanura de arenas cuarcíferas del río Andalién, llanura de arenas negras basálticas del río Biobío, llanura modelada en dunas, marisma Rocuant-Andalién, islas fluviales, dunas y bancos estuariales resultaron inundadas en el modelo hidráulico, debido a sus bajas altitudes < 8 msnm y pendientes inferiores a 0,5.

Además históricamente el crecimiento de la ciudad, mediante rellenos ha modificado la red hídrica, el río Andalién perdió 50,3 ha de cauce en su tramo inferior y aumentó 20,2 ha en su tramo superior, lo que se tradujo en una pérdida neta del -18,4% de la superficie. El manejo del cauce por parte del Estado chileno desde el año 2008 ha disminuido el riesgo de inundación para eventos con tasa de retorno de 2, 5 y 10 años, sin embargo para tasas de retorno elevadas como T=500 el riesgo se mantiene en niveles altos, en este caso la superficie inundada fue similar al evento extremo ocurrido durante el año 2006.

El análisis de peligro realizado mostró que las superficies se incrementaron en un 286% en entre los escenarios correspondientes a tasas de retorno (T) entre 2 y 500 años. La expansión urbana realizada es vulnerable ante futuros eventos de inundación, por ejemplo la superficie destinada a usos residenciales, comerciales e industriales incrementó su superficie inundada de 15 ha en T=2 a 374 ha en T=500 y la cantidad de personas afectadas se incrementó 37.380; se espera que estas cifras continúen en aumento debido a los proyectos inmobiliarios presentes en la llanura de arenas cuarcíferas del río Andalién. Para los eventos extremos entre T=100 y T=500 los niveles de riesgo fueron de un 52%, 28% y 20% para las categorías baja, moderada y alto-extremo respectivamente. Para el evento más extremo evaluado T=500 más de 10 mil viviendas y ≈40 mil personas pueden resultar inundadas, de ellas 2.469 corresponderán a población mayor de 65 años y 393 a discapacitados.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Programa BECAS DOC-NACIONAL Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile CONICYT (Gastos Operacionales N° 21110383) Gobierno de Chile y VRID enlace 214.603.015-10 Dirección de Investigación Universidad de Concepción. Agradecemos los datos aportados por: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y del Centro de Investigación Marítimo Portuario CIMP de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Referencias

Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J., Adler, R., & Robert Brakenridge, G. (2010). A digitized global flood inventory (1998–2008): compilation & preliminary results. *Natural Hazards*, 55(2), 405–422. doi:10.1007/s11069-010-9537-2

Aneas, S. (2000). Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. *Scripta Nova*, 60, 1–15.

- Araujo, R., Silva, G., Freitas, D., & Klein, A. (2009). Georreferenciamiento de fotografías aéreas e análise da variação da linha de costa. In: Alcántara-Carrió, J., Correa, I., Isla, F., Alvarado, M., Klein, A., Cabrera, J., Barlow, R., (Eds). *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*, 123-138 p.
- Arman, H., Yuksel, I., Saltabas, L., Goktepe, F., & Sandalci, M. (2010). Overview of flooding damages & its destructions: a case study of Zonguldak-Bartın basin in Turkey. *Natural Science*, 02(04), 409–417. doi:10.4236/ns.2010.24050
- Arrau Ingeniería E.I.R.L., (2012). *Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de las Obras de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Bío-Bío*. Santiago: Dirección de Obras Hidráulicas Gobierno de Chile.
- Barnes, H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. USGS, Washington
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42(1), 125–148. doi:10.1007/s11069-006-9065-2
- Beighley, R. E., Melack, J. M., & Dunne, T. (2003). Impacts of California's climatic regimens & coastal land use change on streamflow characteristics. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6), 1419–1433.
- Berz, G. (2000). Flood disasters: lessons from the past–worries for the future. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-maritime Engineering*, 148(1), 57-58.
- Broekx, S., Smets, S., Liekens, I., Bulckaen, D., & Nocker, L. De. (2011). Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach. *Natural Hazards*, 245–266. doi:10.1007/s11069-010-9610-x
- Brunner, G.W. (2010). *HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- CIER-SERPLAC (1977). *Carta geológica Concepción Metropolitano*. Escala 1:50.000. Fuente Cartográfica.
- CONAF (2008). *Usos de suelo región del Bío-Bío Año 2008*. Formato Digital SHP.
- CONAMA (2008). *Diseño de Obras Fluviales Río Andalién, Esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Bío Bío OBRAS RIO ANDALIÉN*. Resolución Exenta N° 267, Concepción, 2 de septiembre
- DEFRA. (2006). *Flood risks to people phase 2*. In: R&D Technical Report FD2321. DEFRA & Environment Agency, Flood & Coastal Defence R&D Programme.
- Devynck, J. (1970). *Contribución al conocimiento de la circulación atmosférica en Chile y al clima de la región del Biobío* (p. 165). Universidad de Concepción.
- Djordjević, S., Butler, D., Gourbesville, P., Mark, O., & Pasche, E. (2011). New policies to deal with climate change & other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: the CORFU approach. *Environmental Science & Policy*, 14(7), 864–873. doi:10.1016/j.envsci.2011.05.008

- Eissa, A. E., & Zaki, M. M. (2011). The impact of global climatic changes on the aquatic environment. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 251–259. doi:10.1016/j.proenv.2011.03.030
- Eliot, M. (2012). Sea level variability influencing coastal flooding in the Swan River region, Western Australia. *Continental Shelf Research*, 33, 14–28. doi:10.1016/j.csr.2011.08.012
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2009). ArcGIS 9.3. Redlands, USA: www.esri.com
- Garcia, E., & Loáiciga, H. (2014). Sea-level rise & flooding in coastal riverine flood plains. *Hydrological Sciences Journal*, (October), 37–41. doi:10.1080/02626667.2013.798660
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 70–78. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028
- GESITRAN. (2014). *Usos de suelo Comuna de Concepción Año 2014*. Formato Digital SHP. Universidad mde Concepción
- Ghani, A. A., Chang, C. K., Leow, C. S., & Zakaria, N. A. (2012). Sungai Pahang digital flood mapping: 2007 flood. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 139–148. doi:10.1080/15715124.2012.680022
- Hattermann, F., Kundzewicz, Z.W., Huang, S., Vetter, T., Gerstengarbe, F., & Werner, P. (2013). Climatological Drivers of Changes in Flood Hazard in Germany. *Acta Geophysica*, 61(2), 463-477
- Hernández, T. (1999). *Caracterización Hidrológica y Geomorfológica del río Andalién*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción.
- Ilabaca, P. (1989). Evolución de la costa de Concepción: el caso de las bahías de Concepción y San Vicente. *Biología Pesquera*, 18, 29-35.
- INE. (2002). *Censo de Población y vivienda*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Inostroza, A. (2005). *Crecidas en el Andalién Bajo: Análisis Hidráulico de las intervenciones en su planicie de inundación*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Concepción.
- Jaque, E. (1996). *Análisis Integrado de los sistemas naturales del río Andalién*. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción.
- Jha, A., Lamond, J., Bloch, R., Bhattacharya, N., Lopez, A., Papachristodoulou, N., Bird, A., Proverbs, D., Davies, J., & Barker, R. (2011). Five Feet High & Rising: Cities & Flooding in the 21st Century, Policy Research Working Paper 5648, The World Bank, East Asia & Pacific Region, Transport, Energy & Urban Sustainable Development Unit
- Kadam, P., & Sen, D. (2012). Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (October 2014), 37–41. doi:10.1080/09715010.2012.695449

- Keller, E., & Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. (P. Trad. Gil, Ed.) (p. 422). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London, U.K.
- Kundzewicz, Z. W., & Schellnhuber, H. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31, 111–128.
- Lytle, D. a, & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 94–100. doi:10.1016/j.tree.2003.10.002
- Maaskant, B., Jonkman, S. N., & Bouwer, L. M. (2009). Future risk of flooding: an analysis of changes in potential loss of life in South Holland (The Netherlands). *Environmental Science & Policy*, 12(2), 157–169. doi:10.1016/j.envsci.2008.11.004
- Mah, D., Putuhena, F., & Lai, S. (2011). Modelling the flood vulnerability of deltaic Kuching City, Malaysia. *Natural Hazards*, 865–875. doi:10.1007/s11069-011-9731-x
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245-259
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico : un instrumento para la planificación urbana. *Eure*, XXVII(81), 97–122.
- Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas Chile*, 38, 1–25.
- Mardones, M. (1978). *El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano*. Instituto de Antropología, Historia y Geografía. Universidad de Concepción. 62 pp.
- Masood, M., & Takeuchi, K. (2012). Assessment of flood hazard, vulnerability & risk of mid-eastern Dhaka using DEM & 1D hydrodynamic model. *Natural Hazards*, 61(2), 757–770. doi:10.1007/s11069-011-0060-x
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., & Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards & Earth System Science*, 10(3), 509–527. doi:10.5194/nhess-10-509-2010
- MIDEPLAN, (2006). *Ministerio de Planificación y Cooperación Nacional. Estrategia para el desarrollo regional. La región del Biobío al encuentro del siglo XXI*. Concepción. Chile. Encuesta CASEN 2006.
- Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.04.011
- Morelli, S., Battistini, A., & Catani, F. (2014). Rapid assessment of flood susceptibility in urbanized rivers using digital terrain data: Application to the Arno river case study (Firenze, northern Italy). *Applied Geography*, 54, 35–53. doi:10.1016/j.apgeog.2014.06.032

- Müller, A. (2013). Flood risks in a dynamic urban agglomeration: a conceptual & methodological assessment framework. *Natural Hazards*, 65(3), 1931–1950. doi:10.1007/s11069-012-0453-5
- Nirupama, N., & Simonovic, S. P. (2007). Increase of Flood Risk due to Urbanisation: A Canadian Example. *Natural Hazards*, 40(1), 25–41. doi:10.1007/s11069-006-0003-0
- Ntelekos, A. a., Oppenheimer, M., Smith, J. a., & Miller, A. J. (2010). Urbanization, climate change & flood policy in the United States. *Climatic Change*, 103(3-4), 597–616. doi:10.1007/s10584-009-9789-6
- 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. doi:10.1016/j.biocon.2005.05.015
- Peña, F., Taveres, C., & Mardones, M. (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 38, 83–107.
- Peña, H., & Klohn, W. (1990). Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico. *Revista de La Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(1), 21–38.
- Rahman, A., & Nawaz, A. (2011). Analysis of flood causes & associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Natural Hazards*, 59(3), 1239–1260. doi:10.1007/s11069-011-9830-8
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C. & Vivanco, M. (2013). Assessing land use & cover changes in relation to geographic factors & urban planning in the Metropolitan Area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography*, 39, 93-103.
- Rojas, C., Salado, M.J., Pino, J. & Martori, J. (2011). Medidas para la valoración de la sostenibilidad de los territorios metropolitanos: Aplicación al área metropolitana de Concepción (Chile), *Boletín de Geógrafos Españoles (AGE)*, 55, 81-99.
- Rojas, C., & Plata, W. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un Modelo de Regresión Logística Espacial. En M. C. Pineda & J. Bosque (Eds.), *Actas I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica*. Tegucigalpa: Universidad de Alcalá.
- Rojas, O. (2010). *Evaluación de riesgo de inundación en el curso inferior del río Carampangue, comuna de Arauco, Región del Bío Bío-chile*. Tesis para optar al grado de Licenciado en Educación, Universidad de Concepción.
- Rojas, O. (2015). *Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del Centro sur de Chile*. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción.
- Rojas, O. & Mardones, M. (2013). *Inundaciones Fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile (1960-2010). Tendencias, recurrencia y relación con el fenómeno ENSO*. XXXIV Congreso Nacional y XIX Internacional de Geografía, Universidad del Bío Bío. Octubre, Concepción, Chile.

- Rojas, O., & Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 83–116.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192.
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, XXXI, 97–118.
- Romero, H., Moscoso, C., & Smith, P. (2009). Lecciones y conclusiones sobre la falta de sustentabilidad ambiental del crecimiento espacial de las ciudades chilenas. In R. Hidalgo, C. De Mattos, & F. Arenas (Eds.), *Chile: del país urbano al país metropolitano* (Vol. 2007, pp. 89–110). Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.
- Salinas, E., & Pérez, L. (2011). Procesos urbanos recientes en el Área Metropolitana de Concepción: transformaciones morfológicas y tipologías de ocupación. *Revista de Geografía Norte Grande*, 49, 79–97.
- Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. John Wiley & Sons. New York
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63:1379-1389
- Singh, R. B., & Singh, S. (2011). Rapid urbanization & induced flood risk in Noida, India. *Asian Geographer*, 28(2), 147–169. doi:10.1080/10225706.2011.629417
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43, 81–93.
- Sowmya, K., John, C. M., & Shrivastava, N. K. (2014). Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing & GIS. *Natural Hazards*, 75(2), 1271–1286. doi:10.1007/s11069-014-1372-4
- Suriya, S., & Mudgal, B. V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, 412-413, 210–219. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.008
- Tanavud, C., Yongchalermchai, C., Bennui, A., & Densreeserekul, O. (2004). Assessment of flood risk in Hat Yai municipality, Southern Thailand, using GIS. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1), 1–14.
- Tockner, K., Lorang, M., & Stanford, J. A. (2010). River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic & ecological concepts. *River Research & Applications*, 86(December 2009), 76–86. doi:10.1002/rra
- Vidal, C. & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Biobío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. In: Pérez, L. y Hidalgo, R., *Concepción metropolitana (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.

- Walsh, R., Davies, H., & Musa, S. (1994). Flood frequency & impacts at Khartoum since the early nineteenth century. *Geographical Journal*, 160(3), 266–279.
- Wei, Y. D., & Ye, X. (2014). Urbanization, urban land expansion & environmental change in China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 28(4), 757–765. doi:10.1007/s00477-013-0840-9
- Wheater, H., & Evans, E. (2009). Land use, water management & future flood risk. *Land Use Policy*, 26, S251–S264. doi:10.1016/j.landusepol.2009.08.019
- Yin, J., Ye, M., Yin, Z., & Xu, S. (2014). A review of advances in urban flood risk analysis over China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*. doi:10.1007/s00477-014-0939-7
- Yin, J., Yin, Z., Hu, X., Xu, S., Wang, J., Li, Z., Zhong, H., & Gan, F. (2011). Multiple scenario analyses forecasting the confounding impacts of sea level rise & tides from storm induced coastal flooding in the city of Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*, 407–414. doi:10.1007/s12665-010-0787-9
- Zope, P. E., Eldho, T. I., & Jothiprakash, V. (2014). Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India. *Natural Hazards*, 75(1), 887–908. doi:10.1007/s11069-014-1356-4



5.- DISCUSIÓN GENERAL

Relación entre CCG, ENSO, variabilidad de las precipitaciones extremas y la frecuencia de las inundaciones fluviales en el curso inferior del río Andalién (H1).

Las inundaciones presentaron una recurrencia de promedio de 2,43 años, con una importante variabilidad decadal. Las tasas de retorno por magnitud relativa son similares a los obtenidas por Alarcón (1995), quien determinó que las inundaciones moderadas se presentan cada $T = 4,76$ años; e inundaciones de gran magnitud ocurren cada $T = 20,6$ años. La ocurrencia estacional de los eventos fue consistente con montos pluviométricos >150 mm en el invierno austral. Los montos pluviométricos de la precipitación máxima en 24 horas por período de retorno reportadas aquí, confirman lo evidenciado por Pizarro *et al.* (2012).

La frecuencia decenal de los eventos se mantuvo estable durante los últimos 50 años, variando a un ritmo de 2 a 6 eventos por década. Se registró un menor número de eventos durante la década de 1990, probablemente en relación con el fortalecimiento del Anticiclón Subtropical del Pacífico que dio lugar a un aumento significativo de los años de sequía en el centro de Chile (Quintana & Aceituno 2012). La relativa estabilidad registrada en la frecuencia decadal, se contradice con las magnitudes relativas de las inundaciones en la cuenca, las que han aumentado de manera constante en un 26% y alcanzaron su máximo en la última década. Una tendencia similar, se observa en el norte y centro de Europa, en las regiones del mediterráneo occidental, y Asia oriental, donde se registran las inundaciones más grandes en el siglo XX, en comparación a los últimos cinco siglos (IPCC, 2013; Glaser & Stangl, 2003).

Una pregunta regular que se realiza es si este mayor número de eventos en las cuencas: son expresión de la variabilidad climática o bien resultado del Cambio Climático (Brázdil *et al.*, 2005). El análisis de tendencias pluviométricas en la sección inferior del Andalién que pueden ser asociados al Cambio Climático mostró una disminución de los totales anuales y un ligero aumento en la intensidad de la precipitación concentrada en 24, 48 y 72 horas (Rx1day, Rx2day, Rx3day), R_{95p} , R_{99p} y R30 aunque la mayoría de ellos sin significancia estadística. Sin embargo el análisis de los indicadores Rx1day, Rx2day y Rx3day, mostró un incremento del $\approx 14\%$ al contrastar los periodos de inundaciones 1960-1974 y 1998-2010. La concentración se produce en los meses invernales, durante los cuales históricamente se han registrado la mayoría de los desastres.

Nuestros resultados son coherentes con lo reportado por Donat *et al.* (2013) y Skansi *et al.* (2013) para América del Sur. Donat *et al.* (2013) constataron una tendencia de aumento en la concentración de la precipitación extremas, en el periodo 1951-2010, especialmente en los meses de diciembre a mayo. Skansi *et al.* (2013), también

evidenciaron tendencias claras de intensificación de los eventos extremos de precipitación; aunque, la mayoría de ellos sin significancia estadística. Ambos estudios se realizaron mediante la metodología del ETCCDI, utilizada en la presente investigación, recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Los cambios en las tendencias climáticas anuales a escala local, son compatibles con lo reportado para Chile por Carrasco *et al.* (2005), quienes señalaron una disminución de los montos totales anuales de precipitación desde 1970 y un aumento de la intensidad diaria hacia fines del siglo XX. Resultados similares obtuvieron a escala regional, Quintana & Aceituno (2012), quienes detectaron una reducción de la precipitación anual entre un -2%/década a -5%/década para el período 1950-2007 entre los 37°-43° S; aunque no hubo coincidencia en el incremento de la intensidad de la precipitación, ya que los autores reportaron disminuciones. Estas discrepancias podrían tener relación con la data utilizada, Quintana & Aceituno (2012) trabajaron con datos de todo el siglo XX (1900 en adelante), mientras que en el presente estudio los datos anteriores a 1960 fueron descartados por falta de homogeneidad. Por su parte, Haylock *et al.* (2006) documentaron una tendencia negativa en los índices relacionados con la precipitación diaria en la zona sur de Chile central en el período 1960-2000, particularmente en la frecuencia de días con precipitaciones de más de 10 mm y 20 mm (R10 y R20); se estimó una tendencia similar en esos índices, aunque no significativa.

En cuanto a las inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Andalién en los últimos 50 años, y su relación con la variabilidad climática asociada al ENSO, se encontró una frecuencia similar de inundaciones durante las fases positivas, negativas y neutras de ENSO en los 50 años analizados. Resultados acordes con las correlaciones de anomalías de lluvia-ENSO que determinaron una relación significativa durante la primavera, y consistentes con los hallazgos de Montecinos & Aceituno (2003), para quienes las precipitaciones sobre el promedio, de la región comprendida entre los 35°-38° S, se produce al final de la primavera (correlación de 0,59). En Chile, la influencia del fenómeno ENOS-cálido sobre lluvias extraordinarias en invierno se encuentra bien documentada solo hasta los 35° S (Waylen & Caviedes, 1990; Caviedes & Waylen, 1998; Montecinos & Aceituno, 2003). Esto explicaría los débiles registros de inundaciones en la cuenca asociados a este fenómeno, al sur de esta latitud.

Las inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Andalién ocurrieron 38% durante anomalías positivas, 19% durante anomalías negativas y 42% durante el año neutros. La cuenca se comporta de manera similar a la cuenca chilena del río Carampangue (37° S), donde un análisis de las inundaciones históricas (1971-2008) mostró que el 35% de los casos se asocia a anomalías positivas, el 11,8%, a anomalías negativas y el 52.9% a condiciones neutras (Rojas *et al.* 2010). Montecinos *et al.* (2011) explicaron que la mayoría de las anomalías de precipitación (inviernos lluviosos) durante fases

No-ENSO estarían relacionadas con anomalías vientos del oeste sobre el centro de Chile. Sin embargo, los múltiples procesos involucrados (por ejemplo AAO) en la variabilidad de la precipitación interanual, durante los inviernos no-ENSO, limitan la previsibilidad de la precipitación durante estas condiciones.

A pesar de haber encontrado una débil relación con el ENSO-cálido, se debe considerar que en los últimos años se ha establecido que el calentamiento global estaría provocando cambios en el fenómeno de El Niño. El Niño Modoki o Pseudo El Niño, se presentaría con una frecuencia cada vez mayor, asociadas a TSM más calientes en el Pacífico central (Ashok & Yamagata, 2009; Yeh *et al.*, 2009). Las proyecciones apuntan a que la proporción entre El Niño Modoki/Niño tradicional aumentará hasta 5 veces (Gen *et al.*, 2010; Yeh *et al.*, 2009). Otros autores señalan que el efecto del cambio climático sobre la variabilidad de este fenómeno sigue siendo una cuestión abierta, principalmente por las diferencias que se exhiben de un modelo a otro (Yeh & Kirtman, 2005; Holbrook *et al.*, 2009; Yeh & Kirtman, 2007). Esto adquiere relevancia considerando que sólo los eventos ocurridos durante el mes de agosto se desarrollaron bajo condiciones del ENSO cálido; posiblemente los eventos que ocurran durante este periodo podrían incrementarse debido a estas nuevas condiciones.

Así entonces, la hipótesis propuesta fue parcialmente aceptada. Debido a que en la sección inferior de la cuenca del río Andalién hemos observado una tendencia creciente en los indicadores de precipitación diaria máxima (Rx1day, Rx2day y Rx3day) que pueden ser asociados al incremento de un 26% de la magnitud relativa de los eventos de inundación aquí reportados para el período 1960-2010. Respecto al ENSO en su fase cálida no hemos comprobado una relación estadísticamente significativa con la ocurrencia de inundaciones o precipitaciones altas en invierno austral.

Incidencia de las mareas y de los potenciales aumentos del NMM asociado al CCG, en la magnitud de las inundaciones fluviales (H2).

El río Andalién forma un estuario de tipo micromareal con rangos medios de marea <2 m). La relación realizada entre el registro de inundaciones históricas y los niveles de marea, determinó que un 57% de las inundaciones ocurrieron en condiciones de sicigia o próximas a ellas. En el sur de Chile, un estudio previo realizado por Rojas & Mardones (2003), estableció para el estuario micromareal del río Valdivia (39°S- Chile), una sincronía del 80% de los casos entre inundaciones y mareas de sicigia, considerando sus categorías, la totalidad de las grandes inundaciones y el 80% de las inundaciones medianas se produjeron en condiciones de sicigia; en tanto que solo el 75% de las pequeñas inundaciones, ocurrieron bajo esta condición. Según Garcés-Vargas *et al.* (2013), dicho estuario se comportó en invierno como de cuña salina, sus profundidades varían entre 7-22 m y la influencia de la marea se extiende hasta 50 Km

hacia el interior de su desembocadura, a diferencia del estuario del río Andalién, que se comportó en invierno como un estuario de mezcla con alta estratificación, con profundidades variables (0,5-2,5 m) y una propagación de la marea dinámica hasta 5,9 Km.

El 33% de los eventos restantes en el Andalién ocurrieron en cuadratura, en estas últimas se alcanzó en promedio 1,8 m por condiciones meteorológicas (aumentos del orden de 0.39 m), similar a valores máximos pronosticados durante sicigias. Morales *et al.* (2005) en la Ría de Huelva (estuario de los ríos Odiel y Tinto) al SO de España, demostraron que la marea meteorológica es de importancia en los procesos de inundación elevando el nivel de la marea hasta 1 m por encima de la pleamar correspondiente. También Flick (1998) en California (Estados Unidos) encontró una alta concordancia de inundaciones y las fases coincidentes con mareas altas astronómicas y de tormentas, las que pueden producir un aumento de 0,2-0,3 m en el nivel de la marea en horas.

Los resultados del modelo numérico son concordantes en reconocer la influencia de la marea, en los desbordes del río para la zona media y baja. En los escenarios SLS₁ y SLS₂ la influencia de la marea dinámica se extendió hasta el 6 Km. Para un gran evento como el del año 2006 (SLS₃), la superficie de inundación en la zona media y baja, coincidió con el modelo numérico; para dicho evento se simuló con una altura de marea aguas abajo de 2,34 m, que correspondió a la máxima altura de la pleamar en sicigia más la influencia meteorológica, sin embargo la máxima influencia de la marea se registró hasta el 7 Km.

En los escenarios que incluyeron aumentos del nivel medio del mar para fines del siglo XXI debido al Cambio Climático (SLS₄-SLS₅), la influencia de la marea se produjo hasta el 7.3 Km; el aumento de 60 cm como escenario extremo se tradujo en un aumento de 50 ha (4%) de la superficie inundada, en relación a peor escenario actual SLS₃. Otras investigaciones han evaluado los impactos de un aumento en el SLR en áreas costeras y estuarinas; por ejemplo Mah *et al.* (2011) en la ciudad de Kuching (1° N) emplazada a 30 Km del mar con una altitud de 5 m (Malasia), en el delta del río Sarawak; concluyeron que un incremento del 10% en los niveles de marea actual, resultará en un aumento de las áreas de inundación hasta en un 6% en relación con los niveles de marea existentes. En dicha área las magnitudes de mareas son muy superiores a las registradas en el río Andalién, alcanzando un nivel medio del mar de hasta +4.5 m, esto se puede comprobar con la influencia que ejerce la marea hasta 30 Km valle arriba de la desembocadura del río Sarawak.

Chust *et al.* (2010) determinaron en la costa de Gipuzkoa, Bahía de Biscay (43° N) al norte de España; que un aumento de 48,7 cm para fines del siglo XXI, inundarán 110,8 ha de la zona supralitoral, principalmente en la zona estuarina debido a su morfología llana y plana. En las investigaciones de Chust *et al.* (2010) y Mah *et al.* (2011) las áreas de estudio corresponden a franjas tectónicamente estables. Kuching, se emplaza a 1.320 Km de la zona de subducción entre las placas Australiana y de Sunda (Benz *et*

al., 2011), el área no presenta subducción desde el Mioceno (Di Leo *et al.*, 2012); para el caso de los estuarios mencionados en la Bahía de Biscay, la sismicidad es de baja magnitud (3-5°), escasa frecuencia y superficial (López-Fernández *et al.*, 2008).

En la proyección de aumento del NMM para la Bahía de Concepción (+60 cm) fueron utilizadas proyecciones del IPCC (2013) para la zona central de Chile. Kopp *et al.* (2014) determinaron para el puerto de Valparaíso en la zona central de Chile (33° S) que su sensibilidad al aumento del NMM se encuentra cerca del promedio global, estimándose un ascenso probable para el 2100 entre 0,4-0,8 m. Sin embargo estos estudios no consideran el aumento o descenso del NMM debido a la actividad tectónica diferencial de bloques que se genera en el margen continental activo sudamericano, que hace que la determinación de escenarios de aumentos del NMM sea difícil de establecer a escala histórica (Molina *et al.*, 2011; Isla *et al.*, 2012; Albrecht, comunicación personal, 2015), a diferencia de lo que ocurre en zonas tectónicamente estables como en la Bahía de Biscay o Kuching.

La Bahía de Concepción se emplaza en una zona tectónicamente activa, en donde sismos de gran magnitud ocurrieron periódicamente en los años 1570, 1657, 1751, 1835, 1960 y 2010; asociados a la subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana cuya convergencia se produce a 6,8 cm/año (Kaizuka *et al.*, 1973; Vargas *et al.*, 2011). Para el área de estudio los terremotos de 1835 (magnitud estimada de ca. 8,5) y 1960 (magnitud estimada de ca. 8,1) causaron un alzamiento cosísmicos de 1,2-2,4 m y 2 m respectivamente (Kaizuka *et al.*, 1973). En el reciente terremoto (magnitud de momento $M_w=8.8$) de 2010 el desplazamiento vertical asociado no fue uniforme; la zona cercana a la línea de costa que va desde Talcahuano por la ruta interportuaria hasta el río Andalién presentaron alzamientos alrededor de 50 ± 10 cm, mientras que diversos puntos medidos ingresando por la Cordillera de la Costa presentaron subsidencia, como es el caso del observatorio TIGO de -4 cm (Rivas, 2012; Pulido *et al.*, 2011; Quezada *et al.*, 2010).

La posterior subsidencia intersísmica provoca un descenso de los niveles del alzamiento cosísmico; por ejemplo en el Golfo de Arauco (37° S), la subsidencia entre los terremotos de 1960-2010 provocó que las casas más próximas al mar de varias localidades (Colcura, Tubul, Llico y Punta Lavapié) fueran amenazadas por el mar, especialmente durante marejadas, obligando a enrocados y muros protectores (Quezada *et al.*, 2012). Sin embargo a pesar de estos ciclos, la tendencia es al solevantamiento en los últimos tres terremotos de importancia en la zona; lo que se comprueba con las tasas de alzamiento cada 100 años (100y) estudiadas por Kaizuka *et al.* (1973), mediante C-14, para los últimos 4.000 años; quienes determinaron alzamientos promedios de 0,55m/100y en la Isla Mocha, 0,08m/100y en Isla Santa María y 0,25 m/100y al oeste de la Península de Arauco. Sin embargo en esta zona (Golfo de Arauco) los alzamientos cosísmicos han sido mayores que en Concepción, por ejemplo los terremotos de 1835 y 2010 causaron un solevantamiento de la isla Santa María de 3 m y $2,6\pm 0,5$ m respectivamente (Vargas *et al.*, 2011).

La tendencia al solevantamiento determina que los escenarios futuros con respecto al SRL para el territorio en estudio sean compensados (Contreras *et al.*, 2012). Además los solevantamientos cosísmicos (sumados al descenso relativo del nivel del mar) implican abruptas caídas en el nivel de base de los ríos; por ejemplo los alzamientos co-sísmicos en la costa de la región del Biobío provocados por el terremoto *Mw* 8.8 de 2010 en los ríos Lebu (alzamiento de $1,72 \pm 0,10$ m) y los ríos Tubul y Raqui (1,4 m) (Vargas *et al.*, 2011; Martínez *et al.*, 2012), modificaron el nivel de base de los ríos, influyendo en descargas más rápidas, disecación de los canales y aumento de la erosión, disminuyendo el efecto de la influencia de la marea en las inundaciones. Existen datos en áreas de subsidencia tectónica, que han determinado que el hundimiento contribuye a la mayoría del aumento relativo del nivel medio del mar (RSLR), llegando a representar el 60% a 70%; esto fue calculado para Shanghai (China), que experimenta una subsidencia tectónica en promedio de 22,94 mm/año desde 1921 hasta 2007 (Gong & Yang, 2008 citado por Yin *et al.*, 2011).

En síntesis las inundaciones de elevada magnitud con efectos ambientales importantes (e.g. inundación año 2006) se explicaron mejor cuando se combinaron efectos meteorológicos y astronómicos en sicigias, durante estas últimas condiciones ocurrió un 57% de los eventos en los últimos 50 años. Para las próximas décadas una elevación del NMM de 60 cm atribuidos al Cambio Climático provocaría un incremento de las zonas inundables en un 4% en relación al peor escenario actual; si bien las tendencias de alzamiento costero implicarán un efecto de amortiguación en los pronósticos de SLR realizados para el área. Estas evidencias permiten una aceptación parcial de la hipótesis planteada.

La influencia de las transformaciones físicas del cauce fluvial y de la expansión urbana en los efectos de las inundaciones fluviales (H3).

En el AMC la superficie urbana en la sección inferior de la cuenca del Andalién se incrementó en 1.458 ha en los últimos 68 años; este aumento es característico de las zonas costeras que han llegado a concentrar el 50% de la población mundial (Bárcena *et al.*, 2012; García & Loáiciga, 2014). La ciudad ha utilizado para la expansión urbana un 6.4% (872 ha) de la superficie de relieves de acumulación, expuestos a inundaciones, de estos, 497 ha se ubican en la llanura fluvial del río Andalién. Estos relieves, como señalaron Mardones & Vidal (2001) registran las mayores tasas de peligrosidad al riesgo de inundación en la ciudad de Concepción, debido a sus altitudes <8 m.s.n.m y pendientes inferiores a 0,5°.

La ocupación en zonas con mayor peligro de inundación en la cuenca, explicarían el aumento de barrios afectados por los eventos de inundación, que según Rojas (2015) subió en promedio de 2 por década entre 1960-1999 a 5,5 entre 2000-2012. Entre 1998 y 2012 hubo una alta recurrencia de inundaciones de mediana y principalmente de elevada magnitud; en este período se concentró el 66% de los eventos de gran magnitud ocurridos durante los últimos 50 años, donde se registraron umbrales históricos de altura limnigráfica de 5.4 m y 5.8 m en la estación fluviométrica de cierre

de la cuenca. Este comportamiento de concentración de grandes eventos en la última década es concordante con las investigaciones de Jha *et al.* (2011) quienes indicaron que los daños debido a inundaciones urbanas a escala global son cada vez más intensos, costosos y difíciles de manejar. Berz (2000) demostró que en el mundo las pérdidas económicas debido a las inundaciones en los últimos diez años son diez veces más altos que en la década de 1960 después de realizado un ajuste por inflación. Según Barredo (2007) no hay un número creciente de inundaciones en los últimos años en Europa, lo que existe es un número creciente de los daños causados por las inundaciones. En su análisis realizado entre 1970-2005 mostró que los eventos del 2000 y 2002 se encuentran entre los más devastadores de los últimos 36 años; concluye que las pérdidas económicas debido a las inundaciones en el período 1995-2005, fueron 10 veces más altos que en la década de 1960.

Sin embargo, la expansión de las ciudades, forma parte del desarrollo; el problema se produce debido a la rapidez del proceso de urbanización, que eleva la vulnerabilidad y aumenta la exposición al riesgo debido a la ocupación de las llanuras de inundación (Barredo, 2007; Ghani *et al.*, 2012; Sowmya *et al.*, 2014; Wei & Ye, 2014). Por ejemplo Singh & Singh (2011) en Noida (India) determinaron que el desarrollo urbano en la última mitad del siglo XX en 189 sectores; ha aumentado las inundaciones pequeñas en un 200%; señalan como posibles causas la ampliación de las zonas de expuestas así como cambios en los índices de escorrentía. Resultados similares han obtenido Vidal & Romero (2010) quienes señalan que la urbanización de la sección inferior del Andalién, acrecentó el coeficiente de escorrentía en un 72%, lo cual disminuyó la capacidad potencial de almacenamiento de agua lluvia en -96 mm.

La modelación hidráulica realizada mostró relativa estabilidad en relación a los desbordes que se producen en tasas de retorno de 2, 5 y 10 años; las fallas se concentraron en zonas con baja urbanización, correspondientes al 100% del tramo 1 (desembocadura- Km 6,2) y parte del tramo 2. La concentración de daños en el tramo 1 puede ser explicada por la pérdida de la superficie del lecho menor en 50,3 ha en el período investigado. Por su parte los menores desbordes en el tramo 2 del río pueden ser relacionados con la expansión de la superficie del lecho menor en 20,2 ha; que se explican por las obras de ensanchamiento, encauzamiento y profundización del cauce realizadas luego de la inundación de gran magnitud del año 2006. Estas obras han generado nuevas secciones de los cauces, al dragar 1.428.172 m³ del lecho del cauce entre el 3.2-9.6 Km (Puente Las Ballenas-puente de ferrocarriles) y 636.247 m³ entre los 9.6-13.5 Km (puente de ferrocarriles- confluencia del río Andalién con el estero Palomares), además de obras en el estero Nonguén, según Resolución Exenta N° 267 (CONAMA, 2008).

Como se ha comprobado el manejo del cauce ha sido positivo para las tasas de retorno de mayor frecuencia y corto período; sin embargo para tasas de retorno de 500 años el riesgo se mantiene en niveles elevados pudiendo afectar a 39.283 personas y 10.570 viviendas. Se conoce que un adecuado manejo del cauce orientado

a rellenar y a elevar el nivel topográfico de las riberas puede ser positivo para disminuir el riesgo de inundación como ocurrió en la ribera norte del Río Biobío al SO de la ciudad de Concepción (Mardones & Vidal, 2001). El problema radica en la percepción de “falsa sensación de seguridad”, donde la población piensa que las inundaciones son sucesos del pasado, que ya no ocurrirán debido a la regulación de la cuenca (Ollero, 1997); así según Jha *et al.* (2011) sectores que no se ven sometidos a inundaciones frecuentes, posteriormente son urbanizados; cuando ello ocurre, es probable que nuevas zonas de riesgo reaparezcan o aumenten, como ocurrió en el Mississippi (White, 1958, citado por Aneas, 2000). Esta dinámica hace que con el tiempo los daños provocados por inundaciones en zonas urbanas sean cada vez más intensos, costosos y difíciles de manejar (Hattermann *et al.*, 2013).

En el área de estudio, diversos rellenos destinados a proyectos inmobiliarios urbanos, se están desarrollando sobre las áreas de peligro de inundación fluvial; como la construcción de viviendas unifamiliares en los sectores Carriel Sur y Valle Noble, sobre la llanura fluvial del río Andalién y la futura Plataforma Logística que según Munizaga (2015) afectará principalmente la marisma Rocuant-Andalién. El proceso de urbanización elevará aún más la cantidad de población expuesta, que en la actualidad para una tasa de retorno de 100 años alcanzó las 23 mil personas. Los rellenos sobre la llanura de inundación responden a las características del suelo de fundación que ha sido descrito como: terreno muy bajo, pobremente drenado, ubicado cerca de zonas pantanosas o inundables, con un nivel freático muy superficial, principalmente en invierno (Mardones, 1978).

Inostroza (2005) demostró claramente que una mejor planificación del uso de zonas inundables, al no permitir rellenos y alteraciones del cauce, disminuirían los problemas de inundaciones frecuentes cuando existen crecidas del Andalién. Al respecto, Hattermann *et al.* (2013) señalaron que el desarrollo en zonas bajas se ha transformado en un factor importante en el incremento del riesgo de inundación al eliminar las llanuras de inundación como ha ocurrido en el Andalién. Pero también los efectos de la inundación, se pueden reducir mediante el desarrollo adecuado de medidas de mitigación y gestión de las inundaciones (Aneas, 2000; Zope *et al.*, 2014; Wei & Ye, 2014). La experiencia demuestra que el enfoque estructural (*e.g.* gaviones, canalizaciones) es insuficiente. El enfoque no estructural (*e.g.* protección de áreas ribereñas, mapas de inundación y riesgo) se ha identificado como un buen instrumento para urbanistas y diseñadores de políticas para reducir el grado de impacto de una inundación y generar una reducción efectiva de los daños (Merz *et al.*, 2010; Masood & Takeuchi, 2012; Kadam & Sen, 2012; Morelli *et al.*, 2014; Zope *et al.*, 2014).

Los resultados de esta investigación, llevan a aceptar la hipótesis H3, en forma parcial. Las transformaciones físicas del cauce en la actualidad han disminuido el riesgo de inundación para tasas de retorno de 2, 5 y 10 años, pero para periodos de retorno mayor, el riesgo permanece elevado. Por otra parte el desarrollo de la superficie

urbana en 1.458 ha en los últimos 68 años ha aumentado la exposición y vulnerabilidad frente a estos eventos.

6.- CONCLUSIONES

1. En el territorio Chileno continental se identificaron 5 tipos principales de inundaciones según el factor detonante asociadas a: procesos volcánicos, procesos nivoglaciales, deslizamientos, intervenciones antrópicas y precipitaciones; estas últimas causan el 71% de las inundaciones en el período 1574-2012. A nivel nacional, se observó un patrón zonal de los tipos de eventos dividido en 5 áreas homogéneas, cuya mayor recurrencia se concentró en el dominio climático mediterráneo, donde se localiza la cuenca costera del río Andalién. El aumento de las inundaciones es consistente con montos pluviométricos intensos y cambios ambientales ocurridos durante las últimas tres décadas.

2. En la sección inferior del Andalién se comprobó una alta recurrencia histórica de inundaciones (1960-2010) con una recurrencia promedio de 2,43 años, asociados a intensos eventos de lluvias en invierno superior a 150 mm durante el invierno austral. Existe una frecuencia relativamente homogénea de eventos de crecida en los últimos 50 años, aunque la magnitud relativa aumentó en un 26%. Se observaron tres periodos; el primer periodo entre 1960 y 1974 con una magnitud relativa moderada de inundaciones (7,3); el segundo ciclo 1975-1998 con inundaciones de pequeña magnitud relativa (5,2); y un tercer ciclo 1998-2010 que presentó una alta recurrencia de las inundaciones de la mediana y gran magnitud (9,2).

3. Respecto a la variabilidad asociada al ENSO cálido, no se estableció una relación causa-efecto con eventos ENSO cálido e inundaciones ocurridas durante los meses de mayo, junio y julio, debido a que la vinculación de anomalías de precipitación-ENSO se produce en primavera; pero los eventos de inundación registrados en Agosto, ocurrieron en un 100% con anomalías positivas en la región Niño 3.4. A nivel decadal, la menor frecuencia de eventos se produjo durante las fases de fortalecimiento del Anticiclón del Pacífico como lo evidenció el menor número de inundaciones que ocurrió durante la década de 1990.

4. Se comprobó una ligera tendencia al alza en la intensidad en los índices de precipitación extrema en 24, 48 y 72 horas (R_{x1day} , R_{x2day} , R_{x3day}), R_{95p} , R_{99p} y R_{30} aunque la mayoría de ellos sin significancia estadística para la totalidad de la serie de precipitación analizada (1960-2010). Sin embargo los indicadores de precipitación máxima (R_{x1day} , R_{x2day} , R_{x3day}), al ser analizados por periodos de inundaciones, mostraron un incremento de un $\approx 14\%$ entre 1960-2010 que podría ser asociado con el aumento de la magnitud relativa de las inundaciones de un 26% en el mismo intervalo.

5. En la sección inferior del río Andalién se distinguieron tres ambientes bien definidos según sus características físicas: una zona baja (desembocadura – 2Km), zona media (entre los Km 2-6) y una zona superior (desde el 6 Km). El estuario del río es definido como micromareal dominado por la marea de mezcla parcial; la estratificación fue más alta en invierno y parcial en primavera con caudales de $28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respectivamente. La máxima penetración de la marea de salinidad alcanzó los 3,5 Km y la marea dinámica 5,9 Km desde la desembocadura. El aspecto sinusoidal de las curvas de marea se vio afectado por caudales de $>60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a 2,5 Km de la desembocadura.

6. Las mareas influyeron en los procesos de inundación hasta el 7 Km desde la desembocadura, límite cercano al determinado para la marea dinámica. El 57% de los eventos de inundación ocurrió en condiciones de sicigia o próximas a ella, mientras que el 33% de los eventos se desarrolló en condiciones de cuadratura; sin embargo en estas últimas se demostró que la marea meteorológica puede elevar el nivel máximo de la pleamar astronómica, a umbrales similares a las registradas en sicigia (aumentos del orden de 0.39 m). Las situaciones de peligrosidad más importantes sucedieron en fases coincidentes de mareas de sicigias y tormentas, como lo aconteció durante la inundación catastrófica del año 2006, donde el nivel máximo de marea pronosticado fue de 1,97 m, pero la marea observada fue de 2,30 m.

7. Un SLR de 60 cm atribuidos al Cambio Climático en el escenario SLS₅ para fines del siglo XXI en relación a los niveles de marea actuales provocaría un incremento de las zonas inundables en un 4% en relación al peor escenario actual SLS₃; las superficies inundadas se concentrarían en áreas naturales aún no urbanizadas (83%) y actualmente urbanizadas (17%). Unidades de baja altitud como la marisma Rocuant-Andalién y las llanuras adyacentes resultan inundadas con profundidades variables entre 3-2 m. Es probable, que las zonas urbanas en peligro de inundarse aumenten, considerando la creciente expansión urbana que evidencia el área y los proyectos inmobiliarios en proceso de ejecución como la Plataforma Logística.

8. El aumento de la superficie urbana en 1,458 ha durante los últimos 68 años en la sección inferior del río Andalién ha implicado una modificación de la red hídrica y un incremento progresivo de la exposición frente al peligro de inundación fluvial en unidades geomorfológicas susceptibles a inundación fluvial. La ciudad ha ocupado un 4% de la superficie de los relieves de erosión y un 6,4% de los relieves de acumulación. Los relieves de acumulación como: llanura del río Andalién, llanura del río Biobío, llanura modelada en dunas, marisma Rocuant-Andalién, islas fluviales, dunas y bancos estuariales resultaron inundadas en el modelo hidráulico, debido a sus bajas altitudes $< 8 \text{ msnm}$ y pendientes inferiores a 0,5.

9. El crecimiento histórico de la ciudad, mediante rellenos ha modificado la red hídrica, el río Andalién perdió 50,3 ha de cauce en su tramo inferior y aumentó 20,2 ha en su tramo superior, lo que se tradujo en una pérdida neta del -18,4% de la superficie. El manejo del cauce por parte del Estado chileno desde el año 2008 ha disminuido el

riesgo de inundación para eventos con tasa de retorno de 2, 5 y 10 años, sin embargo para tasas de retorno elevadas como T=500 el riesgo se mantiene en niveles altos, en este caso la superficie inundada fue similar al evento extremo ocurrido durante el año 2006.

10. El análisis de peligro realizado mostró que las superficies aumentaron en un 286% entre los escenarios correspondientes a tasas de retorno (T) entre 2 y 500 años. La urbanización se ha realizado en tejidos muy vulnerables ante futuros eventos de inundación, por ejemplo la superficie destinada a usos residenciales, comerciales e industriales incrementa su superficie inundada de 15 ha en T=2 a 374 ha en T=500 y la cantidad de personas afectadas, se acrecienta de 1.903 a 39.283; se espera que estas cifras continúen en aumento debido a los proyectos inmobiliarios presentes en la llanura del río Andalién. Para los eventos extremos entre T=100 y T=500 los niveles de riesgo fueron de un 52%, 28% y 20% para las categorías baja, moderada y alto-extremo, respectivamente. Para el evento más extremo evaluado T=500, más de 10 mil viviendas y ≈40 mil personas pueden resultar inundadas, de ellas 2.469 corresponderían a población mayor de 65 años y 393 a discapacitados.

11. En relación a la evaluación final de los factores analizados en el curso inferior de la cuenca del Andalién: rol de la tendencia climática, variabilidad climática (ENSO), mareas y urbanización-cambios geomorfológicos. Los factores tendencia climática y mareas, contribuyeron en la generación de inundaciones entre la desembocadura y el 7.3 Km. Sin embargo en el tramo del cauce más urbanizado 7.3-14,8 Km y estero Nonguén las tendencias de aumento en la precipitación extrema de un 14% evaluada por periodo (Rx1day, Rx2day, Rx3day) y el aumento de la urbanización en 872 ha sobre relieves de acumulación altamente expuestos, explicaron de mejor forma las inundaciones de esta zona. El rol del ENSO no fue significativo desde el punto de vista estadístico. Esto nos sugiere que es necesario mejorar la planificación y el ordenamiento territorial, con políticas de uso de suelo y funciones que aseguren una menor vulnerabilidad.

7.- REFERENCIAS GENERALES

- Adhikari, P., Hong, Y., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J., Adler, R., & Brakenridge, R.G. (2010). A digitized global flood inventory (1998–2008): compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, 55(2), 405–422.
- Alarcón, F. (1995). *Evaluación de los riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción, a través de la información del Diario El Sur*. Tesis. Universidad de Concepción, Concepción.
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6, 661–675.
- Alho, P., Russell, A. J., Carrivick, J. L., & Käyhkö, J. (2005). Reconstruction of the largest Holocene jökulhlaup within Jökulsá á Fjöllum, NE Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 24(22), 2319–2334.
- Andrews, E., Antweiler, R., Neiman, P., & Ralph, M. (2004). Influence of ENSO on Flood Frequency along the California Coast. *Journal of Climate*, 17, 337–348.
- Aneas, S. (2000). Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. *Scripta Nova*, 60, 1–15.
- Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie (p.303)*. México: Noriega.
- Araujo, R., Silva, G., Freitas, D., & Klein, A. (2009). Georreferenciamiento de fotografías aéreas e análise da variação da linha de costa. In: Alcántara-Carrió, J., Correa, I., Isla, F., Alvarado, M., Klein, A., Cabrera, J., Barlow, R., Eds. *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*, 123-138 p.
- Arman, H., Yuksel, I., Saltabas, L., Goktepe, F., & Sandalci, M. (2010). Overview of flooding damages and its destructions: a case study of Zonguldak-Bartın basin in Turkey. *Natural Science*, 02(04), 409-417.
- Arnell, N. W. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 31–52.
- Arnone, E., Pumo, D., Viola, F., Noto, L. V., & La Loggia, G. (2013). Rainfall statistics changes in Sicily. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2449–2458. doi:10.5194/hess-17-2449-2013
- Aros, V., & Vargas, J. (1985). Análisis de las crecidas del río Biobío bajo. Aplicación a problemas de inundación en la zona Hualqui-Concepción. In *VII Congreso de Ingeniería Hidráulica*. Santiago.
- Arrau Ingeniería E.I.R.L. (2012). *Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de las Obras de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Bío-Bío*. Santiago: Dirección de Obras Hidráulicas Gobierno de Chile.
- Ashok, K., & Yamagata, T. (2009). The El Niño with a difference. *Nature*, 461, 481-484.

- Ayala-Carcedo, F., & Olcina, J. (2002). Riesgos naturales, conceptos fundamentos y clasificación. In F. Ayala-Carcedo & J. Olcina (Eds.), *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel S.A.
- Azócar, G., & Sanhueza, R. (1999). Evolución del uso del suelo en las cuencas hidrográficas de las lagunas de la comuna de San Pedro de la Paz, Región del Biobío: análisis histórico y tendencias. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 44, 63–78.
- Banasik, K., & Pham, N. (2010). Modelling of the effects of land use changes on flood hydrograph in a small catchment of the Płaskowicka, southern part of Warsaw, Poland. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 42(2), 229–240.
- Bárcena, J. F., García, A., Gómez, A. G., Álvarez, C., Juanes, J. A., & Revilla, J. A. (2012). Estuarine, Coastal and Shelf Science Spatial and temporal flushing time approach in estuaries influenced by river and tide. An application in Suances Estuary (Northern Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 112, 40–51.
- Barnes, H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. USGS, Washington
- Barredo, J. I. (2007). Major flood disasters in Europe: 1950–2005. *Natural Hazards*, 42(1), 125–148. doi:10.1007/s11069-006-9065-2
- Barredo, J. I., & Engelen, G. (2010). Land Use Scenario Modeling for Flood Risk Mitigation. *Sustainability*, 2(5), 1327–1344. doi:10.3390/su2051327
- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llasat, M., Naulet, R., Lemaitre, F., & Barrera, A. (2003). Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Science*, 3, 583–592.
- Batisani, N., & Yarnal, B. (2010). Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. *Applied Geography*, 30(4), 483–489.
- Beighley, R. E., Melack, J. M., & Dunne, T. (2003). Impacts of California's climatic regimens & coastal land use change on streamflow characteristics. *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6), 1419–1433.
- Benz H.M., Herman, M., Tarr, A.C., Hayes, G.P., Furlong, K.P., Villaseñor, A., Dart, R.L., & Rhea, S. (2011). *Seismicity of the Earth 1900–2010 Australia plate and vicinity: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1083-G, scale 1:15,000,000*.
- Berz, G. (2000). Flood disasters: lessons from the past–worries for the future. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-maritime Engineering*, 148(1), 57-58.
- Björnsson, H. (2002). Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change*, 35, 255–271.
- Blott, S., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26 (11), 1237–1248

- Bonilla, C., Bonomelli, C., & Urrutia, G. (2002). Distribución espacial y temporal de la precipitación y humedad del suelo en tres sitios forestales de la VIII región de Chile. *Agricultura Técnica*, 4(64).
- Börgel, R. (1983). *Fundamentos Geográficos del Territorio Nacional*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48(1), 43–48.
- Brath, A., Montanari, A., & Moretti, G. (2006). Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 141–153.
- Bravo, E. (2006). *Proposición de un modelo de evaluación de erodabilidad hidrica para cuencas costeras Mediterráneas: caso de estudio cuenca del río Andalién*. Tesis. Concepción: Universidad de Concepción.
- Bravo, I. (2005). *Efectos de la precipitación antecedente sobre la respuesta hidrológica del río Andalién*. Tesis, Concepción: Universidad de Concepción,
- Brázdil, R., Kundzewicz, Z., & Benito, G. (2006). Historical hydrology for studying flood risk in Europe. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5), 739–764.
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Storch, H. Von, & Luterbacher, J. (2005). Historical Climatology In Europe – The State Of the Art. *Climatic Change*, 70(3), 363–430.
- Breien, H., Blasio, F. V., Elverhøi, A., & Høeg, K. (2008). Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 5(3), 271–280. doi:10.1007/s10346-008-0118-3
- Broekx, S., Smets, S., Liekens, I., Bulckaen, D., & Nocker, L. De. (2011). Designing a long-term flood risk management plan for the Scheldt estuary using a risk-based approach. *Natural Hazards*, 245–266.
- Bronstert, A., Niehoff, D., & Bürger, G. (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 16(2), 509–529.
- Brunner, G.W. (2010). *HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Burrell, B. C., Davar, K., & Hughes, R. (2007). A Review of Flood Management Considering the Impacts of Climate Change. *Water International*, 32(3), 342–359.
- Campos, H., Díaz, G., & Campos, C. (2007). Aportes sedimentarios de los ríos Lluta y San José en la zona costera de la rada de Arica, Chile. *Idesia (Chile)*, 25(2), 37–48.
- Carrasco, J. & Quintana, J., (2004). Descripciones de las condiciones atmosféricas en Chile durante 1997-2000 asociadas a El Niño-La Niña, Oscilación del Sur. In: Avarria, S., et al., eds. *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile (pp. 61-76)*. Valparaíso: CONA.

- Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0° C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrological Sciences*, 50(6), 933–948.
- Carrión, D. (2010). *Análisis de un posible vaciamiento del lago Greve, Campo de Hielo Sur, en relación con distintos escenarios climáticos*. Memoria. Santiago: Universidad de Chile.
- Di Castri, F. & Hajek, E. (1975). *Bioclimatología de Chile* (p. 163). Santiago: Universidad Católica de Chile.
- Caviedes, C. (1998). Influencia de ENOS sobre las variaciones interanuales de ciertos ríos en América del Sur. *Bull. Inst. Études Andines*, 27(3), 627–641.
- Caviedes, C., & Waylen, P. (1998). Respuesta del clima de América del Sur a las fases de ENSO. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 27(3), 613-626.
- CENTRO DE ESTUDIOS CIENTIFICOS (CECS). (2009). *Estrategia nacional de glaciares fundamentos*. Santiago: Dirección General de Aguas.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (CIREN). (2010). *Informe Final, Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. Santiago: CIREN.
- Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C., Pujol, N., Ladouche, B., Martin, E., ... Caballero, Y. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(3), 234–243.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada* (p. 580). McGraw-Hill.
- Chu, H.-J., Lin, Y.-P., Huang, C.-W., Hsu, C.-Y., & Chen, H.-Y. (2010). Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. *Hydrological Processes*, 24(18), 2538–2554.
- Chust, G., Caballero, A., & Marcos, M. (2010). Regional scenarios of sea level rise & impacts on Basque (Bay of Biscay) coastal habitats, throughout the 21st century. *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 87, 113–124.
- CIER-SERPLAC (1977). *Carta geológica Concepción Metropolitano*. Escala 1:50.000. Fuente Cartográfica.
- Comisión Permanente del Pacífico Sur CPPS-PNUMA. (1997). *Evaluación de la vulnerabilidad de las áreas costeras a incrementos en el nivel del mar como consecuencia del calentamiento global: caso de estudio-Bahía de Concepción, Chile*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. CPPS/PNUMA/PSE/IE(97)6. 106 pp.
- CONAF. (2008). *Usos de suelo región del Bío-Bío Año 2008*. Formato Digital SHP.
- CONAMA. (2008). *Diseño de Obras Fluviales Río Andalién, Esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Bío Bío OBRAS RIO ANDALIÉN*. Resolución Exenta N° 267, Concepción, 2 de septiembre

- Contreras, M., Winckler, G., & Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Anales del Instituto de Ingenieros* (Vol. 124, pp. 54–66).
- Cortesi, N., Gonzalez-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & Martin-Vide, J. (2012). Daily precipitation concentration across Europe 1971–2010. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(9), 2799–2810.
- Davies, J. L. (1964). A morphogenetic approach to World shorelines. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 8, 127-142
- De Figueiredo, S. (2013). Modeling climate change effects in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 65, 1933-1938.
- DEFRA. (2006). Flood risks to people phase 2. In: *R&D Technical Report FD2321*. DEFRA& Environment Agency, Flood & Coastal Defence R&D Programme.
- Devynck, J. (1970). *Contribución al conocimiento de la circulación atmosférica en Chile y al clima de la región del Biobío* (p. 165). Concepción: Universidad de Concepción.
- DGA. (1999). *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Di Leo, J. F., J. Wookey, J. O. S. Hammond, J.-M. Kendall, S. Kaneshima, H. Inoue, T. Yamashina, & Harjadi, P. (2012), Mantle flow in regions of complex tectonics: Insights from Indonesia, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13, Q12008.
- Dietz, J., Hölscher, D., Leuschner, C., & Hendrayanto. (2006). Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 237(1-3), 170–178.
- Dilley, M., Chen, R., Deichmann, U., Lerner-Lam, A., & Arnold, M. (2005). *Natural Disaster Hotspots A Global Risk* (p. 148). Washington D.C.: The World Bank.
- Djordjević, S., Butler, D., Gourbesville, P., Mark, O., & Pasche, E. (2011). New policies to deal with climate change & other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: the CORFU approach. *Environmental Science & Policy*, 14(7), 864–873.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., ... Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 2098–2118.
- Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., & Montes, C. (2006). *Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. (C. Duarte, Ed.) (p. 170). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Dussailant, A., Benito, G., Buytaert, W., Carling, P., Meier, C., & Espinoza, F. (2010). Repeated glacial-lake outburst floods in Patagonia: an increasing hazard? *Natural Hazards*, 54(2), 469–481.

- EIC Ingenieros Consultores. (2008). *Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto: "Diseño de obras Fluviales Río Andalién, Esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Bío Bío* (pp. 1–96). Santiago: DOP, Ministerio de Obras Públicas.
- Eissa, A. E., & Zaki, M. M. (2011). The impact of global climatic changes on the aquatic environment. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 251–259.
- Eliot, M. (2012). Sea level variability influencing coastal flooding in the Swan River region, Western Australia. *Continental Shelf Research*, 33, 14–28.
- EM-DAT. *Emergency Events Database Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED)* [En línea]. Université Catholique de Louvain - Ecole de Santé Publique, Brussels, Belgium .<<http://www.emdat.be>>. [October 10, 2012].
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2009). ArcGIS 9.3. Redlands, USA: www.esri.com
- Falvey, M. (2007). *Climate change and Chile's water resources*. Contributions From: Garreaud, R., Norotte, T., Sánchez, R., Rojas, M., Fuenzalida, H., & Aceituno, P. October 16, Ppt presentation.
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, 1–16. doi:10.1029/2008JD010519
- Flick, R.E., (1998). Comparison of California tides, storm surges, and mean sea level during the El Niño winters of 1982–1983 and 1997–1998. *Shore and Beach*, 66 (3), 7–11.
- Folk, R., Andrews, P. & Lewis, D. (1970). Detrital sedimentary rock classification & nomenclature for use in New Zeland. *New Zeland Journal of Geology & Geophysics* 13: 937-968.
- Frêne, C., & Núñez, M. (2010). Hacia un nuevo Modelo Forestal en Chile. *Revista Bosque Nativo*, (47), 25-35.
- Fu, G., Yu, J., Yu, X., Ouyang, R., Zhang, Y., Wang, P., ... Min, L. (2013). Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009. *Journal of Hydrology*, 487, 48–59.
- Gallien, T. W., Schubert, J. E., & Sanders, B. F. (2011). Predicting tidal flooding of urbanized embayments: A modeling framework & data requirements. *Coastal Engineering*, 58(6), 567–577.
- Garcés-Vargas, J., Ruiz, M., Pardo, L. M., Nuñez, S. & Pérez-Santos, I. (2013). Caracterización hidrográfica del estuario del río Valdivia, centro-sur de Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(1), 113-125
- Garcia, E., & Loáiciga, H. (2014). Sea-level rise & flooding in coastal riverine flood plains. *Hydrological Sciences Journal*, (October), 37–41.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., ... Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 70–78.

- Gayoso, J., e Iroumé, A. (1995). Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque*, 16(2), 3-12
- Geis, D., & Steeves, B. (1980). Flood Hazards. *J A E*, 33(4), 28–31.
- Gemmer, M., Jiang, T., Su, B., & Kundzewicz, Z. W. (2008). Seasonal precipitation changes in the wet season and their influence on flood/drought hazards in the Yangtze River Basin, China. *Quaternary International*, 186(1), 12–21.
- Gen, L., Baohua, R., Chengyun, Y., & Jianqiu, Z. (2010). Indices of El Niño and El Niño Modoki: An Improved El Niño Modoki Index. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (5), 1210-1120.
- GESITRAN. (2014). *Usos de suelo Comuna de Concepción Año 2014*. Formato Digital SHP. Concepción: Universidad de Concepción
- Ghani, A. A., Chang, C. K., Leow, C. S., & Zakaria, N. A. (2012). Sungai Pahang digital flood mapping: 2007 flood. *International Journal of River Basin Management*, 10(2), 139–148.
- Gilroy, K. L., & McCuen, R. H. (2012). A nonstationary flood frequency analysis method to adjust for future climate change and urbanization. *Journal of Hydrology*, 414-415, 40–48.
- Glaser, R., & Stangl, H. (2003). Historical floods in the Dutch Rhine Delta. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 605–613.
- Glavovic, B. C., Saunders, W. S. a., & Becker, J. S. (2010). Land-use planning for natural hazards in New Zealand: the setting, barriers, “burning issues” and priority actions. *Natural Hazards*, 54(3), 679–706.
- González, P. (1987). Perspectiva Geográfica del Riesgo de Inundación en la ciudad de Talca. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 30, 63–79.
- González-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Gutiérrez, E., & Larraín, P. (1986). Bases, patrones productivos y potencialidades del sistema natural. In *Geografía de la Región Metropolitana de Santiago* (p. 294). Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Haralambidou, K., Sylaios, G., & Tsihrintzis, V.A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90, 174-184
- Harambour, S. (2012). Río Las Minas, una personalidad geológicamente inestable. In *Seminario “La cuenca del Río Las Minas, transformando una pesadilla en un sueño” 26 de abril*. Universidad de Magallanes.
- Hattermann, F., Kundzewicz, Z.W., Huang, S., Vetter, T., Gerstengarbe, F., & Werner, P. (2013). Climatological Drivers of Changes in Flood Hazard in Germany. *Acta Geophysica*, 61(2), 463-477
- Haylock, M., Peterson, T., Alves, L., Ambrizzi, T., Anunciação, T., Baez, J., ... Vincent, L. (2006). Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19, 1490–1512.

- Henríquez, C. (2009). El proceso de urbanización en la cuenca del río Chillán y su capacidad adaptativa ante precipitaciones extremas. *Estudios Geográficos*, 70(266), 155–179.
- Hernández, T. (1999). *Caracterización hidrológica y geomorfológica del río Andalién*. Tesis. Concepción: Universidad de Concepción.
- Hitz, S., & Smith, J. (2004). Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, 14(3), 201–218. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.04.010
- Holbrook, N.J., Davidson, J., Feng, M., Hobday, A.J., Lough, J.M., McGregor, S. & Risbey, J.S. (2009) El Niño-Southern Oscillation. In *A Marine Climate Change Impacts and Adaptation Report Card for Australia 2009* (Eds. E.S. Poloczanska, A.J. Hobday and A.J. Richardson), NCCARF Publication 05/09.
- Hooke, J. M. (2006). Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79, 311–335.
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 2198(July), 2181–2198.
- Howard, D. a., Luzzadder-Beach, S., & Beach, T. (2012). Field evidence and hydraulic modeling of a large Holocene jökulhlaup at Jökulsá á Fjöllum channel, Iceland. *Geomorphology*, 147-148, 73–85.
- Huang, X., Tan, H., Zhou, J., Yang, T., Benjamin, A., Wen, S. W., ... Li, X. (2008). Flood hazard in Hunan province of China: an economic loss analysis. *Natural Hazards*, 47(1), 65–73.
- Huber, A., Irumé, A., Mohr, C., y Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Bosque*, 31(3), 219-230.
- Ilabaca, P. (1989). Evolución de la costa de Concepción: el caso de las bahías de Concepción y San Vicente. *Biología Pesquera*, 18, 29-35.
- INE. (2002). *Censo de Población y vivienda*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Inostroza, A. (2005). *Crecidas en el Andalién Bajo: Análisis Hidráulico de las intervenciones en su planicie de inundación*. Memoria. Concepción: Universidad de Concepción.
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers. In: Solomon, S. ; Qin, D. ; Manning, M ; Chen, Z. ; Marquis, M. ; Averyt, K. B. ; Miller, M., Et Al. (EDS). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

- Isla, F.; Quezada, J.; Martínez, C.; Fernández, A. & E. Jaque. (2012). The evolution of the Bío Bío delta & the coastal plains of the Arauco Gulf, Bío Bío Region: the Holocene sea-level curve of Chile. *Journal of Coastal Research*, 28, 102-111.
- Jakobsen, F., Hoque, A., Paudyal, G.N., Bhuiyan, M. (2005). Evaluation of the short-term processes forcing the monsoon river floods in Bangladesh. *Water International*, 30(3), 389–399.
- Jaque, E. (1996). *Análisis Integrado de los sistemas naturales del río Andalién*. Tesis Doctoral. Centro EULA, Concepción: Universidad de Concepción.
- Jaque, E. (2010). Diagnóstico de los paisajes Mediterráneos Costeros. Cuenca del río Andalién, Chile. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 81–97.
- Jha. A., Lamond, J., Bloch, R., Bhattacharya, N., Lopez, A., Papachristodoulou, N., Bird, A., Proverbs, D., Davies, J., & Barker, R. (2011). Five Feet High & Rising: Cities & Flooding in the 21st Century, Policy Research Working Paper 5648, The World Bank, East Asia & Pacific Region, Transport, Energy & Urban Sustainable Development Unit
- Junk, W., Bayley, P., & Sparks, R. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. In D. Dodge (Ed.), *Proceedings of the International Large River Symposium* (pp. 110–217). Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.
- Kadam, P., & Sen, D. (2012). Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, (October 2014), 37–41.
- Kaizuka, S., Matsuda, T., Nogami, M. & Yonekura, N., (1973). Quaternary tectonic and recent seismic crustal movements in the Arauco Peninsula and its environs, Central Chile- *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 8, 1-49.
- Keller, E., & Blodgett, R. (2007). *Riesgos naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. (P. Trad. Gil, Ed.) (p. 422). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4th ed.). London, U.K: Charles Griffin.
- Kopp, R., Horton, R., Little, C., Mitrovica, J., Oppenheimer, M., Rasmussen, D., Strauss, S., & Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st & 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 383–407.
- Kovacic, I. (1991). Determinación de áreas de riesgos por inundación en la comuna de Vitacura. *Rev. Geográfica de Chile Terra Australis*, 34, 39–60.
- Kulkarni, A., Eldho, T., Rao, E., & Mohan, B. (2014). An integrated flood inundation model for coastal urban watershed of Navi Mumbai, India. *Natural Hazards*, 403–425.
- Kundzewicz, Z. W., & Schellnhuber, H. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31, 111–128.
- Lara, L. E. (2009). The 2008 eruption of the Chaitén Volcano , Chile : a preliminary report. *Andean Geology*, 36(1), 125–129.

- Lim, H. S., Boochabun, K., & Ziegler, A. D. (2012). Modifiers and Amplifiers of High and low Flows on the Ping River in Northern Thailand (1921–2009): The Roles of Climatic Events and Anthropogenic Activity. *Water Resources Management*, 26(14), 4203–4224.
- López-Fernández, C., Pulgar, J.A., Gallar, J., González-Cortina, J.M., Díaz, J., & Ruíz, M. (2008). Zonación sismotectónica del NO de la Península Ibérica. *Geo-Temas*, 10, 1-4
- Lytle, D. a, & Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(2), 94–100.
- Maaskant, B., Jonkman, S. N., & Bouwer, L. M. (2009). Future risk of flooding: an analysis of changes in potential loss of life in South Holland (The Netherlands). *Environmental Science & Policy*, 12(2), 157–169.
- Madden, C.; Goodin, K.; Allee, R.; Bamford, D. & Kinkbeiner, D. (2008). Clasificación Ecológica Estandarizada Costera y Marina- Versión III: La clasificación de referencia para hábitats marinos para la Red Temática de Ecosistemas IABIN. *NatureServe*, 36 pp.
- Mah, D., Putuhena, F., & Lai, S. (2011). Modelling the flood vulnerability of deltaic Kuching City, Malaysia. *Natural Hazards*, 865–875.
- Mann, H.B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13,245-259
- Mardones, M. (1978). *El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano*. Instituto de Antropología, Historia y Geografía. Universidad de Concepción. 62 pp.
- Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico : un instrumento para la planificación urbana. *Eure*, XXVII(81), 97–122.
- Mardones, M., Echeverría, F., & Jara, C. (2004). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile Centro Sur: efectos ambientales de las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área Metropolitana de Concepción. *Investigaciones Geográficas Chile*, 38, 1–25.
- Mardones, M., Hernanández, H., Pacheco, A., & Millán, J. (2001). *Geografía de la Región del Biobío. VIII Región*. Colección de Geografía de Chile. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Mariangel, W. (1990). Aplicación al pie de monte de la comuna de La Reina, de un parámetro primordial para la expansión urbana: El Riesgo Físico. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 32, 51–71.
- Martínez, C., Rojas, O., Aránguiz, R., Belmonte, A., Altamirano, A., & Flores, P. (2012). Riesgo de tsunami en caleta Tubul, Región del Biobío: escenarios extremos y transformaciones territoriales posterremoto. *Revista de geografía Norte Grande*, 53, 85-106.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., & Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change*, 60(1-2), 85–100.
- Masood, M., & Takeuchi, K. (2012). Assessment of flood hazard, vulnerability & risk of mid-eastern Dhaka using DEM & 1D hydrodynamic model. *Natural Hazards*, 61(2), 757–770.

- Mendoza, F. (2004). Desarrollo de un modelo de pronóstico de crecidas para la cuenca del río Andalién (p. 73). Tesis: Universidad de Concepción.
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., & Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards & Earth System Science*, 10(3), 509–527.
- MIDEPLAN, (2006). Ministerio de Planificación y Cooperación Nacional. *Estrategia para el desarrollo regional. La región del Biobío al encuentro del siglo XXI*. Concepción: Encuesta CASEN 2006.
- Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70.
- Molina, M., Contreras, M., Winckler, G., Salinas, S., & Reyes, M. (2011). Consideraciones sobre las variaciones de mediano y largo plazo del oleaje en el Diseño de obras marítimas en Chile Central. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (Vol. 123, pp. 77–88).
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería*. México: Alfaomega S.A.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16, 281–296.
- Montecinos, A., Kurgansky, M. V., Muñoz, C., & Takahashi, K. (2011). Non-ENSO interannual rainfall variability in central Chile during austral winter. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(3-4), 557–568.
- Morales, J. A., Pons, J. M., & Catano, M. (2005). Introducción al análisis de los riesgos de inundación en las riberas de las áreas estuarinas: El caso de las poblaciones adyacentes a la Ría de Huelva (SO España). *Geogaceta*, 37, 243-246.
- Morelli, S., Battistini, A., & Catani, F. (2014). Rapid assessment of flood susceptibility in urbanized rivers using digital terrain data: Application to the Arno river case study (Firenze, northern Italy). *Applied Geography*, 54, 35–53.
- Mudelsee, M., Borngen, M., & Tetzlaff, G. (2004). Extreme floods in central Europe over the past 500 years: Role of cyclone pathway "Zugstrasse Vb." *Journal of Geophysical Research*, 109(D23), D23101.
- Müller, A. (2013). Flood risks in a dynamic urban agglomeration: a conceptual & methodological assessment framework. *Natural Hazards*, 65(3), 1931–1950.
- Munizaga, J. (2015). *Cambios en la superficie del humedal Andalién-Rocuant 2004-2014* (p. 122). Tesis. Universidad de Concepción.
- Muñoz, M. (2007). *Análisis de crecidas a través de balance hídrico: aplicación al río Andalién mediante embalse lineal*. Memoria. Concepción: Universidad del Bío-Bío.
- Muñoz, O. (1990). Quebrada de Macul: un factor de desequilibrio físico en la comuna de La Florida. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 32, 103–134.

- Narbona, J. (2005). Necesidad de un sistema de alerta de inundaciones por crecidas del río Andalién. In *Taller Iberoamericano sobre inundaciones y desastres naturales*. Perú.
- Niemeyer, H. (1982). *Hoyas Hidrográficas de Chile: Octava Región* (p. 41).
- Niemeyer, H. & Cereceda, P. (1984). *Hidrografía*. Geografía de Chile. Tomo VIII. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Nilsson, C., Reidy, C. a, Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science (New York, N. Y.)*, 308(5720), 405–408.
- Nirupama, N., & Simonovic, S. P. (2007). Increase of Flood Risk due to Urbanization: A Canadian Example. *Natural Hazards*, 40(1), 25–41.
- Ntelekos, A. a., Oppenheimer, M., Smith, J. a., & Miller, A. J. (2010). Urbanization, climate change & flood policy in the United States. *Climatic Change*, 103(3-4), 597–616.
- OEA. (1993). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C.: Organización de Estados Americanos.
- Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). (2011). *Análisis de impactos por Sistemas Frontales de magnitud*. Santiago: ONEMI.
- Olang, L. O., & Fürst, J. (2011). Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: model estimates for the Nyando River Basin, Kenya. *Hydrological Processes*, 25(1), 80–89.
- Oliver, J. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 32(3), 300–309.
- Ollero, A. (1997). Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico un planteamiento didáctico. *Lurralde Inves. Esp.*, 20, 261–283.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). [En Línea]. <<http://www.paho.org/chi/>>. [Octubre 15, 2012].
- Ortleb, L. (1995). Eventos El Niño y Episodios Lluvioso en el Desierto de Atacama: El registro de los dos últimos siglos. *Bull. Inst. Études Andines*, 24(3), 519–537.
- Oyarzun, C., Frêne, C., Lacrampe, G., Huber, A., & Herbé, P. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *Bosque (Valdivia)*, (32), 10-19
- Panahi, A., Alijani, B., & Mohammadi, H. (2010). The Effect of the Land Use/Cover Changes on the Floods of the Madarsu Basin of Northeastern Iran. *Journal of Water Resource and Protection*, 02(04), 373–379.
- 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.

- Peña, F. (1995). Geomorfología de la ribera norte del río Biobío en su curso inferior. Limitaciones y potencialidades del área. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 22, 27–33.
- Peña, F., Taveres, C., & Mardones, M. (1993). Las condiciones climáticas como factor de riesgo en la comuna de Talcahuano. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 38, 83–107.
- Peña, H. (1986). *Desastres de origen hidrológico* (p. 7). Santiago: Dirección General de Aguas, MOP.
- Peña, H., & Escobar, F. (1983). *Análisis de una crecida por vaciamiento de una represa glacial* (p. 20). Santiago.
- Peña, H., & Klohn, W. (1990). Hidrología de desastres en Chile; crecidas catastróficas recientes de origen no meteorológico. *Revista de La Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 5(1), 21–38.
- Penning-Rowsell, E. C. (1996). Flood-hazard response in Argentina. *Geographical Review*, 86(1), 72–90.
- Perillo, G. & M. Piccolo. 1993. Methodology to study estuarine cross-sections. *Revista Geofísica*, 38: 189-206.
- Pettitt A.N (1979) A non-parametric approach to the changepoint problem. *Applied statistics*, 28, 126-135
- Pizarro, J., & Castillo, C. (2006). Eventos meteorológicos severos ocurridos en Chile Continental: descripción y patrones sinópicos tipos asociados. *Informe Dirección Meteorológica de Chile*, 173.
- Pizarro, R., Valdés, R., García-Chevesich, P., Vallejos, C., Sanguesa, C., Morales, C., ... Fuentes, R. (2012). Latitudinal analysis of rainfall intensity and mean annual precipitation in Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(June), 252–261.
- Prisma Ingeniería Limitada. (2004). *Diagnóstico y Proposición de Soluciones Río Andalién, Comuna de Concepción, VIII Region*. M.O.P. - D.O.H., Gobierno de Chile.
- Pulido, H. (1992). *Estudio hidrológico forestal de la cuenca del río Andalién* (p. 75). Tesis. Concepción: Universidad de Concepción.
- Pulido, N., Yagi, Y., Kumagai, H. & Nishimura, N. (2011). Rupture process and coseismic deformations of the 27 February 2010 Maule Earthquake, Chile. *Earth Planets Space*, 63, 1–4.
- Quezada, J., Jaque, E., Fernández, A., & Vásquez, D. (2012). Cambios en el relieve generados como consecuencia del terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro sur de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 53: 35-55.
- Quezada, J.; Jaque, E.; Belmonte, A.; Fernández, A.; Vásquez, D. & Martínez, C. (2010). Movimientos cosísmicos verticales y cambios geomorfológicos generados durante el

- terremoto Mw = 8,8 del 27 de febrero de 2010 en el centro – sur de Chile. *Revista Geográfica del Sur*, 2, 11 – 45.
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S. *Atmósfera*, 25, 1–22.
- Quintanilla, V. (1995). Riesgos que actúan sobre el medio ambiente de la ciudad de Santiago. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 15, 559–569.
- Rahman, A., & Nawaz, A. (2011). Analysis of flood causes & associated socio-economic damages in the Hindukush region. *Natural Hazards*, 59(3), 1239–1260.
- Rebolledo, J. (1987). El Impacto de la expansión de la ciudad de Talca en el medio ambiente natural. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 30, 63–79.
- Rivas, L. (2012). *Red Geodésica Nacional SIRGAS – Chile*. Departamento Geodésico Instituto Geográfico Militar Chile. Presentación.
- Rodríguez, P. (1999). Impacto del ENSO en Chile. In *I Encuentro de Universidades del Pacífico Sur, Perú 14, 15 y 16 de Octubre*.
- Rojas, C., Pino, J., Basnou, C. & Vivanco, M. (2013). Assessing land use & cover changes in relation to geographic factors & urban planning in the Metropolitan Area of Concepción (Chile). Implications for biodiversity conservation. *Applied Geography*, 39, 93-103.
- Rojas, C., Salado, M.J., Pino, J. & Martori, J. (2011). Medidas para la valoración de la sostenibilidad de los territorios metropolitanos: Aplicación al área metropolitana de Concepción (Chile), *Boletín de Geógrafos Españoles (AGE)*, 55, 81-99.
- Rojas, C., & Mardones, M. (2003). Las Inundaciones en la ciudad de Valdivia. Eventos Históricos 1899-2002. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 34, 225-242.
- Rojas, C., & Plata, W. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un Modelo de Regresión Logística Espacial. En M. C. Pineda & J. Bosque (Eds.), *Actas I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica*. Tegucigalpa: Universidad de Alcalá.
- Rojas, O. (2015). *Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del Centro sur de Chile*. Tesis Doctoral Centro EULA, Concepción, Universidad de Concepción.
- Rojas, O. (2010). *Evaluación de riesgo de inundación en el curso inferior del río Carampangue, comuna de Arauco, Región del Bío-Bío Chile*. Tesis, Concepción: Universidad de Concepción.
- Rojas, O. & Mardones, M. (2013). *Inundaciones Fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile (1960-2010). Tendencias, recurrencia y relación con el fenómeno ENSO*. XXXIV Congreso Nacional y XIX Internacional de Geografía, Universidad del Biobío. Octubre, Concepción, Chile.

- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192.
- Rojas, O., Martínez, C., & Jaque, E. (2010). Recurrencia Histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, región del Bío-Bío. *Tiempo Y Espacio*, 25, 117–135.
- Rojas, O., & Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 83–116.
- Rojas, Q., & Plata, W. (2010). Área Metropolitana de Concepción: Factores espaciales explicativos de su crecimiento urbano reciente (2001-2009) por medio de un Modelo de Regresión Logística Espacial. In M. C. Pineda & J. Bosque (Eds.), *Actas I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica*. Tegucigalpa: Universidad de Alcalá.
- Romero, H., & Mendonça, M. (2009). Análisis comparativo de los factores naturales y urbanos de las inundaciones ocurridas en las ciudades costeras de Valparaíso y Florianópolis. *Cuaderno de Investigación Urbanística*, 66, 96–107.
- Romero, H., Moscoso, C., & Smith, P. (2009). Lecciones y conclusiones sobre la falta de sustentabilidad ambiental del crecimiento espacial de las ciudades chilenas. In R. Hidalgo, C. De Mattos, & F. Arenas (Eds.), *Chile: del país urbano al país metropolitano* (Vol. 2007, pp. 89–110). Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, XXXI, 97–118.
- Rutlland, J. (2004). Aspectos de la circulación atmosférica de gran escala asociada al ciclo ENOS 1997-1999 y sus consecuencias en el régimen de precipitación en Chile central. In S. Avarría, J. Carrasco, J. Rutlland, & E. Yañez (Eds.), *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile* (pp. 61–76). Valparaíso: CONA.
- Rutlant, J., & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*.
- Salinas, E., & Pérez, L. (2011). Procesos urbanos recientes en el Área Metropolitana de Concepción: transformaciones morfológicas y tipologías de ocupación. *Revista de Geografía Norte Grande*, 49, 79–97.
- Sarricolea, P., Meseguer, O., & Martín-Vide, J., (2014). Variabilidad y tendencias climáticas en Chile central en el período 1950-2010 mediante la determinación de los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 64, 227-247
- Schumm, S. (1977). *The fluvial system*. John Wiley & Sons. New York
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63:1379-1389.
- Singh, R. B., & Singh, S. (2011). Rapid urbanization & induced flood risk in Noida, India. *Asian Geographer*, 28(2), 147–169.

- Skansi, M. D. L. M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J. A., Bentancur, O. J., ... Jones, P. D. (2013). Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307.
- Smith, P., & Romero, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién , Los Batros y Lengua. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43, 81–93.
- Solín, L., Feranec, J., & Nováček, J. (2011). Land cover changes in small catchments in Slovakia during 1990–2006 and their effects on frequency of flood events. *Natural Hazards*, 56(1), 195–214.
- Sowmya, K., John, C. M., & Shrivastava, N. K. (2014). Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing & GIS. *Natural Hazards*, 75(2), 1271–1286.
- Stern, N.H. (2007). *The economics of climate change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Strahler, A. & Strahler, A. (1992). *Geografía Física*. Barcelona: Omega.
- Suriya, S., & Mudgal, B. V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed – A case study. *Journal of Hydrology*, 412-413, 210–219.
- Tanavud, C., Yongchalermchai, C., Bennui, A., & Densreeserekul, O. (2004). Assessment of flood risk in Hat Yai municipality, Southern Thailand, using GIS. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1), 1–14.
- Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M., & Wilson, T. L. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 360(1796), 1511–25. doi:10.1098/rsta.2002.1013
- Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M., & Roo, A. (2009). The European Flood Alert System- Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 125–140.
- Thorp, J. H. (2009). Models of Ecological Processes in Riverine Ecosystems. *Encyclopedia of Inland Waters*, 1, 448–455.
- Tockner, K., Lorang, M., & Stanford, J. A. (2010). River flood plains are model ecosystems to test general hydrogeomorphic and ecological concepts. *River Research and Applications*, 86(December 2009), 76–86.
- Tockner, K., Malard, F., & Ward, J. (2000). An extension of the flood pulse concept. *Hydrological Processes*, 2883(July 1999), 2861–2883.
- Tu, M., Hall, M. J., Laat, P. J. M. De, & Wit, M. J. M. De. (2005). Extreme floods in the Meuse river over the past century : aggravated by land-use changes ? *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 267–276. doi:10.1016/j.pce.2004.10.001
- Urrutia de Hazbún, R., & Lanza, C. (1993). *Catástrofes en Chile 1541-1992* (p. 440). Santiago: La Noria.

- Vannéy, J. (1970). *L'Hydrologie du bas Guadalquivir* (p. 175). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S. & Melnick, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8.8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38 (1), 219-238.
- Vargas, G., Ortlieb, L., & Rutllant, J. (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile*, 27(2), 1–21.
- Vargas, J., & Langdon, R. (2007). Influencia del sistema de embalses Ralco-Pangué en las crecidas del Biobío. In *XVII congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Santiago.
- 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. In L. Pérez & R. Hidalgo (Eds.), *Concepción metropolitano (AMC). Planes, procesos y proyectos*. Santiago: Geolibros, Universidad Católica de Chile.
- Vidal, C., Lagos, L., Espinoza, J., Arancibia, V., & Yañez, M. (2001). Aportes al ordenamiento territorial urbano: Evaluación de riesgos naturales en Concepción y aplicación de SIG. *Urbano*, 4(5), 56–62.
- Vuille, M., & Keimig, F. (2004). Interannual Variability of Summertime Convective Cloudiness and Precipitation in the Central Andes Derived from ISCCP-B3 Data. *Journal of Climate*, 17(17), 3334–3348. d
- Walsh, R., Davies, H., & Musa, S. (1994). Flood frequency and impacts at Khartoum since the early nineteenth century. *Geographical Journal*, 160(3), 266–279.
- Waylen, P., & Caviedes, C. (1990). Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the Aconcagua river basin, Chile. *Journal of Hydrology*, 120, 79-102.
- Wei, Y. D., & Ye, X. (2014). Urbanization, urban land expansion & environmental change in China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 28(4), 757–765.
- Wentworth, C.K. (1922). A scale of grade & class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30: 377-392.
- Wheater, H., & Evans, E. (2009). Land use, water management & future flood risk. *Land Use Policy*, 26, S251–S264.
- Worni, R., Stoffel, M., Huggel, C., Volz, C., Casteller, A., & Luckman, B. (2012). Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). *Journal of Hydrology*, 444-445, 134–145.
- Xie, Z., ShangGuan, D., Zhang, S., Ding, Y., & Liu, S. (2013). Index for hazard of Glacier Lake Outburst flood of Lake Merzbacher by satellite-based monitoring of lake area and ice cover. *Global and Planetary Change*. 107, 229-237.

- Yan, Y., Ouyang, Z., Guo, H., Jin, S., & Zhao, B. (2010). Detecting the spatiotemporal changes of tidal flood in the estuarine wetland by using MODIS time series data. *Journal of Hydrology*, 384(1-2), 156–163.
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J., & Reyes, E. (2013). Understanding the Coastal Ecosystem-Based Management Approach in the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, 63, 243-261.
- Yang, Z., Wang, T., Khangaonkar, T., & Breithaupt, S. (2012). Integrated modeling of flood flows & tidal hydrodynamics over a coastal floodplain. *Environ Fluid Mech*, 63–80.
- Yeh, S., & Kirtman, B. (2005). *ENSO amplitude changes in climate change projections*. Recuperado el 25 de Mayo de 2011, de ftp://www.iges.org/pub/ctr/ctr_190.pdf
- Yeh, S.-W., & Kirtman, B. P. (2007). ENSO amplitude Changes due to Climate Change Projections in Different Coupled Models. *American Meteorological Society* , 203-217.
- Yeh, S.-W., Kug, J.-S., Dewitte, B., Kwon, M.-H., Kirtman, B., & Jin, F.-F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature* , 461, 511-514.
- Yin, J., Ye, M., Yin, Z., & Xu, S. (2014). A review of advances in urban flood risk analysis over China. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*. doi:10.1007/s00477-014-0939-7
- Yin, J., Yin, Z., Hu, X., Xu, S., Wang, J., Li, Z., Zhong, H., & Gan, F. (2011). Multiple scenario analyses forecasting the confounding impacts of sea level rise & tides from storm induced coastal flooding in the city of Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*, 407–414.
- Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Wang, J., & Xu, S. (2013). Modelling the combined impacts of sea-level rise & land subsidence on storm tides induced flooding of the Huangpu River in Shanghai, China. *Climatic Change*, 919–932.
- Yin, Y., Xu, Y., & Chen, Y. (2009). Relationship between flood/drought disasters and ENSO from 1857 to 2003 in the Taihu Lake basin, China. *Quaternary International*, 208(1-2), 93–101.
- Zope, P. E., Eldho, T. I., & Jothiprakash, V. (2014). Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India. *Natural Hazards*, 75(1), 887–908.