



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN EL HUMEDAL BOCA MAULE: APORTES PARA LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental



MARIANA ALEJANDRA RODRÍGUEZ ÁVILA

Profesor guía: Dr. Octavio Rojas Vilches

Profesor co-guía: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza

Concepción, Chile

2021.

“Modelación de inundaciones en el humedal Boca Maule: Aportes para la planificación territorial”

PROFESOR GUÍA: Dr. OCTAVIO ROJAS VILCHES



PROFESOR CO- GUÍA: Dr. PEDRO ARRIAGADA SANHUEZA



PROFESOR COMISIÓN: Dr. MAURICIO AGUAYO ARIAS



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, agosto 2021



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU



TESIS FINANCIADA MEDIANTE FONDECYT N° 1190251
"EFECTOS DE URBANIZACIÓN Y ACCESIBILIDAD EN LOS
HUMEDALES URBANOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE
CONCEPCIÓN (URBANCOST II)" (2019-2022)

INVESTIGADOR RESPONSABLE DRA. CAROLINA ROJAS.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Jenny y César, y a mis hermanos: Alexander, Romina y Consuelo, por acompañarme en este camino y nunca dejar de creer en mí.

A mis increíbles amigas y amigos de la vida y de la universidad, sin su apoyo y compañía este proceso habría sido mucho más difícil.

A mi compañera, Ceci, por su amor y apoyo en la recta final de esta etapa universitaria.

A mis profesores guías, Octavio y Pedro, por compartir sus conocimientos e invitarme a creer en mis capacidades como profesional.



ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE DE CONTENIDO	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE ANEXOS	vi
RESUMEN	vii

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. PROBLEMÁTICA	1
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	4
3. OBJETIVOS	5
3.1. OBJETIVO GENERAL	5
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4. MARCO TEÓRICO	5
4.1. HUMEDALES	5
4.1.1. Tipos de humedales	6
4.1.2. Humedales urbanos	7
4.1.3. Servicios ecosistémicos de humedales	9
4.1.4. Servicios ecosistémicos de regulación en humedales	10
4.2. INUNDACIONES FLUVIALES	13
4.2.1. Modelación de inundaciones	15
4.3. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL EN PROCESOS DE INUNDACIÓN	16
5. MATERIALES Y MÉTODOS	17
5.1. ÁREA DE ESTUDIO	17
5.2. METODOLOGÍA	19
5.2.1. COMPARAR LA NORMATIVA URBANA DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL DEL HUMEDAL BOCA MAULE CON CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA	20
5.2.2. CALCULAR CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO	22
5.2.3. CONTRASTAR ZONAS DE INUNDACIÓN MODELADAS CON LAS ZONIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	31

6. RESULTADOS	35
6.1. COMPARACIÓN DE LA NORMATIVA URBANA DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL DEL HUMEDAL BOCA MAULE CON CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA.....	35
6.1.1. REGULACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN CHILE.....	35
6.1.1.1.Ley General de Urbanismo y Construcciones y Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones.....	35
6.1.1.2.Ejemplos de aplicación en planes reguladores de reciente modificación	37
6.1.2. INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL VIGENTES A ESCALA COMUNAL.....	43
6.1.3. CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA.....	50
6.1.4. COMPARACIÓN CON CASOS INTERNACIONALES.....	57
6.2. CÁLCULO DE CAUDALES DE CRECIDAS MÁXIMAS PARA PERÍODOS DE RETORNO DE HASTA 100 AÑOS	59
6.2.1. Método DGA-AC.....	61
6.2.2. Método Verni y King modificado.....	63
6.2.3. Fórmula racional.....	65
6.2.4. Comparación entre los métodos propuestos y la frecuencia de caudales máximos de las estaciones fluviométricas.....	67
6.3. CONTRASTE DE ZONAS DE INUNDACIÓN MODELADAS CON LA ZONIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL.....	69
6.3.1. Modelación de inundaciones	69
6.3.2. Superficie afectada por inundaciones según la zonificación de los Instrumentos de planificación territorial.....	71
7. CONCLUSIONES	77
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
9. ANEXOS	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Clasificación de humedales según la Convención Ramsar.....	6
Tabla N°2: Clasificación de ecotipos desde Guía de Manejo Sustentable de Humedales ..	7
Tabla N°3: Servicios ecosistémicos de los humedales	9
Tabla N°4: Factores detonantes y condicionantes de las inundaciones	14
Tabla N°5: Curva de frecuencia regional caudales medios diarios máximos zona homogénea Up pluvial – Gumbel – VIII región – C. Costera.....	25

Tabla N°6: Factores de conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo	26
Tabla N°7: Coeficiente C(T=10 años) Fórmula Verni y King modificado	27
Tabla N°8: Coeficientes de fórmulas empíricas	28
Tabla N°9: Coeficiente C(T=10) Fórmula Racional	29
Tabla N°10: Información creada en el entorno HEC-GeoRas.....	33
Tabla N°11: Valores de rugosidad recomendados por tablas de ayuda de HEC-RAS.....	33
Tabla N°12: Áreas de riesgo definidas por la OGUC (Art. 2.1.17).....	37
Tabla N°13: Zonas de peligro de inundación según profundidad	38
Tabla N°14: Recomendaciones para zonas de peligro de inundación.....	38
Tabla N°15: Normas urbanísticas de la zona ZRI-1	41
Tabla N°16: Normas urbanísticas de la zona ZRI-2	41
Tabla N°17: Zonificación y usos permitidos por el PRMC.....	45
Tabla N°18: Zonificación y usos permitidos por el PRC.....	48
Tabla N°19: Vulnerabilidad al riesgo de inundación y estructuras compatibles con las zonas de riesgo	51
Tabla N°20: Zonas de riesgo según calados y períodos de retorno	53
Tabla N°21: Usos de suelo según zonas de riesgo.....	53
Tabla N°22: Áreas de riesgo moderado de inundación	56
Tabla N°23: Áreas de alto riesgo de inundación	56
Tabla N°24: Resumen de criterios incorporados en Reino Unido.....	57
Tabla N°25: Resumen de criterios incorporados en España.....	58
Tabla N°26: Resumen de criterios incorporados en Estados Unidos.....	58
Tabla N°27: Estaciones metereológicas con influencia dentro de la cuenca	60
Tabla N°28: Distribuciones de frecuencia para (P_{24}^{10}) para la estación Carriel Sur	60
Tabla N°29: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método DGA-AC.....	61
Tabla N°30: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método DGA-AC.....	62
Tabla N°31: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método DGA-AC.....	62
Tabla N°32: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método Verni y King modificado	63
Tabla N°33: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método Verni y King modificado.....	64

Tabla N°34: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método Verni y King modificado.....	64
Tabla N°35: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método Fórmula Racional.....	65
Tabla N°36: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método Fórmula Racional	66
Tabla N°37: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método Fórmula Racional	67
Tabla N°38: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero Maule.....	67
Tabla N°39: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero La Posada	68
Tabla N°40: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero Lagunillas	68
Tabla N°41: Superficie afectada por inundación según el período de retorno	70
Tabla N°42: Superficie afectada por inundaciones según zonificación PRMC (2017) para períodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años.....	72
Tabla N°43: Superficie afectada por inundaciones según zonificación PRC (2013) para períodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N°1: Rol de los humedales en la reducción del peak de crecida de los flujos de aguas pluviales.....	11
FIGURA N°2: Delimitación área de estudio.....	18
FIGURA N°3: Principales cursos hídricos que alimentan el humedal Boca Maule	19
FIGURA N°4: Diagrama de integración metodológica	20
FIGURA N°5: Síntesis metodológica.....	22
FIGURA N°6: Esquema de cálculo del método DGA-AC para caudales instantáneos máximos pluviales	24
FIGURA N°7: Zonas homogéneas ubicadas al sur de la latitud 35°S.....	24
FIGURA N°8: Esquema de cálculo del método Verni y King modificado.....	27
FIGURA N°9: Esquema de cálculo de la fórmula racional	29
FIGURA N°10: Pasos de ejecución del software HEC-RAS en conjunto con ArcGIS y HEC-GeoRAS	32

FIGURA N°11: Puntos de validación del modelo de inundación.....	34
FIGURA N°12: Zonificación PRMC (2017) en la delimitación del humedal Boca Maule ...	44
FIGURA N°13: Tipos de usos permitidos en el PRMC, para el humedal Boca Maule.....	45
FIGURA N°14: Zonificación PRC (2013) en la delimitación del humedal Boca Maule	47
FIGURA N°15: Tipos de usos permitidos en el PRC, para el humedal Boca Maule.....	49
FIGURA N°16: Modelación de la extensión de inundación del humedal Boca Maule	70
FIGURA N°17: Comparación de zonas de inundación con la zonificación del PRMC.....	72
FIGURA N°18: Zonificación según el PRMC en zonas de inundación.....	73
FIGURA N°19: Comparación de zonas de inundación con la zonificación del PRC.....	74
FIGURA N°20: Zonificación según el PRMC en zonas de inundación.....	76

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N°1: Infraestructura según vulnerabilidad en zonas de riesgo en Reino Unido según “Technical Guidance to the National Planning Policy Framework”	85
ANEXO N°2: Parámetros estadísticos de análisis de frecuencia para los datos meteorológicos de la estación Carriel Sur	86
ANEXO N°3: Análisis de frecuencia para los períodos de retorno de 2 hasta 100 años de la estación meteorológica Carriel Sur	87
ANEXO N°4: Distribuciones de frecuencia para la precipitación máxima en 24 hrs para la estación Carriel Sur	87
ANEXO N°5: Análisis de frecuencia para los períodos de retorno de 2 hasta 100 años de las estaciones fluviométricas.....	88
ANEXO N°6: Resultado encuestas de validación del modelo de inundación	90

RESUMEN

Los humedales brindan una serie de servicios ecosistémicos (SE) a la población humana, entre ellos destaca su rol como regulador de desastres hidrológicos, donde actúan como mitigadores en eventos de inundación fluvial, proceso natural en el cual el flujo desborda los límites del cauce. Las inundaciones han aumentado en frecuencia y magnitud en las últimas décadas a escala global, situación que en Chile presenta una tendencia similar, principalmente en lugares donde se desarrollan procesos de urbanización creciente, como en el Área Metropolitana de Concepción (AMC). Bajo ese contexto, la presente investigación busca analizar las zonas inundables asociadas al humedal Boca Maule de la comuna de Coronel y su integración en los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) vigentes.

Se realizó un análisis de criterios urbanos internacionales de zonificación de áreas inundables para la planificación territorial, los que fueron comparados con la regulación del humedal presente en la zonificación del Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC) y el Plan Regulador Comunal de Coronel (PRC), lo que permitió determinar que no existe un criterio homogéneo en la zonificación del humedal y que ambos instrumentos carecen de un análisis de peligro de inundación, lo que permite usos de suelo urbano con actividades transitorias y no residenciales.

Mediante modelaciones hidráulicas (unidimensional) para diferentes períodos de retorno, se identificaron las zonas inundables asociadas al humedal, donde para un escenario más probable (período de retorno de 2 años) la superficie afectada fue de 59.84 hectáreas y para un escenario más extremo (período de retorno de 100 años) fue de 72.78 hectáreas, sobrepasando el límite del humedal en un 8% y 32% respectivamente.

Finalmente, las zonas de inundación modeladas fueron comparadas con la zonificación del humedal presente en los instrumentos de planificación, donde se determinó que las superficies afectadas por inundación son consideradas principalmente como parque de nivel intercomunal y zona inundable por desborde

de cauces, según el PRMC y el PRC respectivamente, sin incorporar criterios hidrológicos al momento de establecer los usos de suelo permitidos en el humedal.

Palabras claves: humedal Boca Maule, zonas de inundación, inundaciones fluviales, modelación hidráulica, instrumentos de planificación territorial.



1. PROBLEMÁTICA

Según la Convención Ramsar los humedales ocupan entre el 8% al 10% de la superficie del planeta (Ramsar, 1999), son ecosistemas de transición entre ambientes terrestres y acuáticos, donde el nivel freático se encuentra por lo general, en o cerca de la superficie, o la tierra está cubierta por agua poco profunda. (Cowardin et al., 1979). Presentan innumerables beneficios a la humanidad, desde el suministro de agua y alimentos, hasta el control de crecidas, recarga de aguas subterráneas y mitigación del cambio climático. Pese a ello, son ecosistemas vulnerables, debido a diferentes intervenciones, entre las que se destacan la extracción de agua, transformación a tierras de cultivo, urbanización, contaminación y sobreexplotación de recursos. (SINC, 2010).

La intervención o transformación de humedales genera impactos ambientales, sociales y económicos; ya que al degradar estos ecosistemas convirtiéndolos en zonas agrícolas, loteos inmobiliarios, infraestructuras de conexión, entre otros, se está alterando la capacidad del humedal para proporcionar los servicios ecosistémicos que obtenemos los seres humanos de los ecosistemas.

Desde el año 1900 a la fecha, han desaparecido entre un 64% y un 71% de los humedales del planeta. Entre 1900-2000, se aceleró la pérdida de estos ecosistemas, incrementando 3,7 veces más que en siglos anteriores. (Ramsar, 2015). Los humedales costeros son los que han sufrido una mayor pérdida de superficie (Davidson, 2014) principalmente por la urbanización (Mitsch & Gosselink, 2015), estos brindan una serie de servicios ecosistémicos (SE) a las poblaciones adyacentes, según la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005), contribuyen con la purificación del agua y detoxificación de desechos, regulación del clima, mitigación del cambio climático, servicios culturales y disminuyen la naturaleza destructiva de las inundaciones; bajo este contexto, los humedales pueden contribuir a que las comunidades tengan la suficiente resiliencia para prepararse ante un desastre, afrontarlo y recuperarse. (Ramsar, 2016).

Debido al crecimiento acelerado de la población mundial, se han generado áreas urbanas con infraestructura deficiente, suponiendo efectos negativos sobre el

recurso hídrico, incluyendo el drenaje superficial (Tucci, 1998), lo que ha hecho de estas zonas un lugar más susceptible a desastres hidrológicos como las inundaciones, causando en muchos casos daños a las personas, al medio ambiente y a la economía (Martínez, 2004). La Convención Ramsar propone considerar a los humedales dentro de la planificación territorial para afrontar desastres hidrológicos; existen distintos ejemplos en el mundo de como la protección de estos ecosistemas ayuda a afrontar las consecuencias derivadas de las inundaciones, por ejemplo, las fuerzas armadas de Estados Unidos adquirieron territorios aledaños al río Charles en Massachusetts, estimando que los costos provocados por eventuales inundaciones aumentarían en 17 millones de dólares anuales, si las 3.400 ha de humedales colindantes al río fueran rellenadas. (Mitsh & Gosselink, 2015).

En Chile existen más de 30 mil humedales, lo que se traduce en 1.268.100 ha, sin considerar las turberas que se encuentran en las regiones de Los Lagos y Magallanes (MMA, 2015), pese a ello, sólo 13 catalogan como humedales de importancia internacional o Sitios Ramsar, abarcando una superficie de 361.761 ha. Más del 89% de la población del país vive en ciudades (UN, 2014), lo que resulta preocupante para los humedales situados dentro de los límites urbanos, ya que existe un desconocimiento importante respecto a la valoración de los servicios ecosistémicos que ellos proporcionan (Gómez-Baggenthun & Barton, 2013), siendo propensos a sufrir cambios de uso de suelo, canalizaciones, dragados, entre otros, que modifican la hidrología de dichos ecosistemas, afectando a las comunidades biológicas, como también la calidad, cantidad y regulación del agua.

La expansión de las zonas urbanas hacia la costa y la ocupación de territorios cercanos a cauces de ríos se presenta como un desafío para la planificación territorial, ya que estas áreas son susceptibles a riesgos ambientales, como tsunamis, marejadas e inundaciones fluviales (Andrade, 2012). La pérdida de humedales a nivel mundial se ha traducido en la reducción de los mecanismos naturales para la protección ante peligros como las inundaciones, reduciendo la capacidad de resiliencia de las comunidades humanas. Según cifras del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entre el año 1970 y 2001, las

inundaciones fluviales dejaron un saldo aproximado de 246 mil fallecidos, 145 millones de afectados y 69 millones de dólares en daños económicos. (PNUMA, 2003).

En Chile, la intensidad o persistencia de la precipitación explica la ocurrencia del 71% de las inundaciones durante los últimos 500 años (Rojas et al., 2014), en el catastro realizado por Rojas et al., (2014), se identificaron 227 eventos de inundación fluvial en el período 1574-2012. La zona mediterránea del país, comprendida entre la región de Valparaíso y del Biobío, presenta una alta recurrencia de inundaciones fluviales asociadas a sistemas frontales, que resultan de las altas precipitaciones como así también de los drásticos cambios ambientales a los que se ha sometido esta zona. (Rojas et al., 2014; Smith y Romero, 2009)

Los cambios ambientales en la región del Biobío, principalmente en el Gran Concepción, se deben principalmente al crecimiento urbano, que registró un aumento de 4.920 ha en el período 1975-2004, causando deterioro de los ecosistemas de humedal. (Smith y Romero, 2009). Se estima que este deterioro siga en aumento debido a los proyectos inmobiliarios potenciales en la zona (Rojas et al., 2019). En la región del Biobío además se encuentran importantes cuencas costeras, como, por ejemplo, la cuenca del río Andalién, que ha experimentado un 700% de crecimiento de su superficie urbana entre 1955-2007 (Vidal y Romero, 2010) y ha registrado 21 eventos de inundación entre 1960-2010, de estos cinco fueron de elevada magnitud entre 2000-2010. (Rojas et al., 2014).

Es preocupante analizar la velocidad con la que se han expandido las áreas urbanas y cómo esto ha afectado a distintos ecosistemas. En los últimos 50 años, los seres humanos hemos transformado los ecosistemas más rápida y extensamente que en ningún otro período de tiempo de la historia de la humanidad (MEA, 2005), lo que, sin lugar a duda, ha aumentado la degradación de los humedales alrededor del mundo. La alteración de estos ecosistemas se ha apoyado en una falta de conocimientos e investigaciones para afrontar con datos cuantitativos la presión que sufren los humedales, lo que resulta ser un desafío para la planificación territorial, que hasta el momento no ha sido capaz de gestionar correctamente estos

ecosistemas. Con la implementación de la Ley 21.202 de Humedales Urbanos, que modifica diversos cuerpos legales, es posible incorporar a los humedales insertos en las ciudades en la planificación del territorio, permitiendo establecer las condiciones bajo las que puedan otorgarse permiso de urbanizaciones o construcciones dentro de estos ecosistemas. La ley establece que para delimitar un Humedal Urbano hay 3 criterios de delimitación: 1) presencia de vegetación hidrófita, 2) presencia de suelos hídricos con mal o sin drenaje y 3) un régimen hidrológico de saturación ya sea permanente o temporal que genera condiciones de inundación periódica. Es importante señalar que cumpliendo uno de estos tres criterios, ya podemos dar cuenta de la existencia de un humedal, independiente de la presencia o no de los otros dos, cualquiera que fuera. (Ley N°21.202).

En Chile, existe una carencia de estudios sobre el rol de los humedales ante procesos de inundación, por lo que no se han considerado como actores relevantes para crear comunidades resilientes ante desastres hidrológicos. Bajo este contexto, el presente estudio busca ser un aporte al conocimiento del rol mitigador de inundaciones de los humedales urbanos, específicamente, del Humedal Boca Maule de la comuna de Coronel.

2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Ante la alta recurrencia de inundaciones y la disminución de humedales urbanos en el Gran Concepción:

¿El criterio hidrológico de inundaciones se encuentra representado en la zonificación del humedal Boca Maule en los Instrumentos de Planificación Territorial de escala comunal y metropolitana?

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las zonas inundables asociadas al humedal Boca Maule y su integración en los Instrumentos de Planificación Territorial vigentes.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la normativa urbana presente en los Instrumentos de Planificación Territorial vigentes asociados al humedal Boca Maule con criterios internacionales de planificación urbana.
- Calcular caudales máximos para diferentes períodos de retorno.
- Contrastar zonas de inundación modeladas con las zonificaciones de los Instrumentos de Planificación Territorial vigentes.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. HUMEDALES

El concepto de humedal no se encuentra estandarizado, una de las definiciones más aceptadas es la que entrega la Convención sobre los Humedales o Convención Ramsar, que los define como “extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros”. (Ramsar,1971). El convenio propone a las partes contratantes modificar la definición según la realidad del país. Cowardin et al., (1979), definen a los humedales como “zonas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos, donde el nivel freático está, por lo general, en o cerca de la superficie, o la tierra está cubierta por agua poco profunda”. Para ser considerados humedales, deben presentar una o más de las siguientes características:

- Al menos periódicamente, el suelo se encuentra predominantemente cubierto por hidrófitos o plantas acuáticas.

- Los suelos deben ser predominantemente saturados de agua sin escurrimiento.
- El sustrato se satura con agua o es cubierto por agua poco profunda en algún momento durante la temporada de crecimiento de cada año.

En Chile, la definición de humedales que propone el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) es “ecosistemas asociados a sustratos saturados temporal o permanentemente de agua, los cuales permiten la existencia y desarrollo de la biota acuática” (MMA, 2011). Del mismo modo, el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), los define como una “amplia variedad de hábitats interiores, costeros y marinos que comparten ciertas características. Generalmente, se los identifica como áreas que se inundan temporalmente, donde la Napa freática aflora en la superficie o en suelos de baja permeabilidad cubiertos por agua poco profunda”.

4.1.1. Tipos de humedales

La clasificación de humedales es tan diversa como su definición y puede basarse en características espaciales, morfológicas, climáticas, entre otras. La Convención Ramsar define los principales tipos de humedales en seis categorías (Tabla N°1).

Tabla N°1: Clasificación de humedales según la Convención Ramsar.

Tipo	Descripción
Marinos	Humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas, pastos marinos y arrecifes de coral.
Estuarinos	Incluidos deltas, marismas de mareas y manglares.
Lacustres	Humedales adyacentes a lagos.
Ribereños	Humedales adyacentes a ríos y arroyos.
Palustres	Pantanosos – marismas, pantanos y ciénagas.
Artificiales	Estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales.

Fuente: Ramsar (1971).

En el año 2006, en Chile, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), presentó la Guía para el Manejo Sustentable de Humedales, la cual centra su

clasificación (Tabla N°2) en el uso de la visión ecosistémica, donde la unidad de análisis es el ecotipo, que corresponde a una familia de humedales que tienen propiedades compartidas, e incluso amenazas similares. Para la definición de ecotipo, se deben identificar los factores forzantes, los cuales son una expresión de factores fisicoquímicos que regulan su estructura y funcionamiento, por ejemplo, el clima, la hidrología, topografía entre otros. La guía reconoce la falta de antecedentes nacionales sobre humedales, lo que limita su gestión.

Tabla N°2: Clasificación de ecotipos desde la “Guía de Manejo Sustentable de Humedales”.

Ecotipos	Clase	Tipo	Variedad
Humedal marino	-	-	-
Humedal costero	Intrusión salina	Cubeta, canal, plano	-
Humedal continental	Evaporación	Cubeta, canal, plano	Ácidos orgánicos, isoterma 0°C
	Infiltración e infiltración saturado	Cubeta, canal, plano	
	Escorrentía	Cubeta, canal, plano	
	Afloramiento de aguas subterráneas	Cubeta, canal, plano	

Fuente: CONAMA (2006).

4.1.2. Humedales urbanos

Categorizar a los humedales urbanos nace de la necesidad de poder identificar territorios que presentan condiciones de humedal y se encuentran insertos en zonas urbanas; pero que no son reconocidos como tal. Lamentablemente, los humedales ubicados dentro de los límites urbanos son más propensos a sufrir intervenciones y son degradados por la urbanización y las infraestructuras de transporte (Rojas, 2018). La convención Ramsar reconoce que los humedales urbanos son un aporte a las comunidades y que, bajo un manejo adecuado, son capaces de entregar una serie de beneficios a las personas, contribuyendo incluso a la consolidación de

zonas urbanas sostenibles (Ramsar, 2008). Considerando los Objetivos Globales de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el objetivo 11 sobre Ciudades y Comunidades Sostenibles; los humedales urbanos se presentan como una oportunidad para crear ciudades más seguras, resilientes y saludables.

En Chile los humedales urbanos han sido ecosistemas altamente degradados y abandonados históricamente. La falta de reconocimiento de estos ecosistemas en la planificación territorial y la legislación urbana, que regula la expansión de las ciudades, ha promovido la destrucción sistemática de humedales a lo largo del país, principalmente en la zona centro sur (Rojas, 2020).

El 23 de enero del 2020 se promulgó la ley 21.202 de Humedales Urbanos, la cual introduce el concepto de Humedal Urbano en la legislación chilena y modifica diversos cuerpos legales con el objetivo de proteger de manera específica los humedales que se encuentren total o parcialmente dentro de áreas urbanas. El Reglamento de la ley de humedales urbanos, que entró en vigencia el 24 de noviembre del 2020, tiene por objeto establecer los criterios mínimos para la sustentabilidad de los humedales urbanos, para el resguardo de sus características ecológicas y su funcionamiento y la mantención del régimen hidrológico, tanto superficial como subterráneo, integrando dimensiones sociales, económicas y ambientales; además, establece el procedimiento mediante el cual el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) declarará humedales urbanos a solicitud de los municipios o actuando de oficio.

Las mayores modificaciones de esta ley son corregir algunas carencias de la normativa chilena como la Ley General de Urbanismo y Construcción (LGUC), que no consideraba a los humedales y propiciaba el relleno de estos ecosistemas para la edificación de viviendas. Además de incorporar a los humedales urbanos en los instrumentos de planificación territorial, como los Planes Reguladores Comunales (PRC); y finalmente, reconocer a los humedales en la Ley sobre Bases Generales del Medioambiente (Ley 19.300), agregando una nueva causal de ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) para aquellos proyectos que puedan significar una alteración total o parcial de estos ecosistemas.

4.1.3. Servicios ecosistémicos de humedales

El concepto de servicio ecosistémico (SE) se ha planteado a lo largo de los años de diferentes formas, en 1977 Westman formaliza el término como los servicios de la naturaleza para las sociedades (Díaz et al., 2018); en forma más reciente la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, por sus siglas en inglés) define los SE, como los beneficios que obtenemos los seres humanos directa o indirectamente de los ecosistemas (MEA, 2005), además propone clasificar los SE en tres grupos: provisión (agua, alimentos), regulación (control de desastres, control de la contaminación, regulación del clima) y culturales (espirituales, recreación). Pese a los beneficios que proporcionan los ecosistemas para la vida humana, existe una gran paradoja respecto a cómo la sobrevaloración de algunos SE puede ir en desmedro de otros, como priorizar el SE de provisión lo que resulta en perjuicio para aquellos servicios ligados a la conservación de la biodiversidad o regulación ante desastres (Balvanera et al., 2012).

Los humedales se encuentran entre los ecosistemas más importantes del planeta, puesto que proporcionan un gran número de SE (Clarkson et al., 2013; Mitsch et al., 2015); entre ellos Ramsar destaca el control de inundaciones, reposición de aguas subterráneas, estabilización de costas y protección contra tormentas, retención y exportación de sedimentos y nutrientes, depuración de aguas, reservorios de biodiversidad, valores culturales, recreación y turismo, mitigación del cambio climático y adaptación a él; es posible ver algunos ejemplos de los servicios que proporcionan los humedales en la tabla N°3. Constanza et al., (1997), estimaron que los SE brindados por los humedales alcanzan a U\$17.5 trillones de dólares por año, lo que representa el 52% del valor total de los servicios que los ecosistemas brindan a la humanidad.

Tabla N°3: Servicios ecosistémicos de los humedales.

Tipo	Servicio
Provisión	Alimentación
	Aguas para usos diversos
	Materias primas de orden biológico
	Materias primas de origen mineral

	Energías renovables
	Acervo genético
	Medicinas naturales y principios activos
Regulación	Regulación climática
	Regulación de la calidad del aire
	Regulación hídrica (cantidad y calidad)
	Regulación morfosedimentaria
	Formación y fertilidad de suelos
	Regulación de desastres naturales
	Control biológico
Culturales	Conocimiento científico
	Conocimiento ecológico local
	Identidad cultural y sentido de permanencia
	Valor espiritual y religioso
	Paisaje – valoración estética
	Actividades recreativas y ecoturismo
	Educación ambiental

Fuente: Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2012).

4.1.4. Servicios ecosistémicos de regulación en humedales

Uno de los SE de regulación que brindan los humedales tiene que ver con la protección ante desastres hidrológicos; bajo este contexto el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) recomienda que se tenga en cuenta el rol de los ecosistemas, incluidos los humedales, como un medio para frenar el impacto de los peligros. De la misma forma, la Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres (UNISDR, por sus siglas en inglés) destaca la protección de los humedales como una oportunidad para la resiliencia ante desastres. El SE de protección ante desastres hidrológicos que poseen los humedales tiene que ver con que son capaces de almacenar y purificar el agua, además funcionan como amortiguadores hidrológicos o esponjas naturales, que recolectan y retienen el agua durante las inundaciones y la liberan de forma gradual regulando los flujos de agua (Padmavathi et al., 2017), como se muestra en la figura 1, donde es posible observar que la presencia de humedales disminuye la magnitud del peak de crecida en comparación a la ausencia de humedales.

Este tipo de servicio de los humedales fue reconocido desde mediados de la década de 1970, antes de esto existía poca preocupación y comprensión de ellos, por lo que muchos fueron dragados y destruidos como medida de gestión y manejo. En

un comienzo la gestión de humedales se basó en la conservación de las condiciones hidrológicas para la preservación de peces y plantas acuáticas (Mitsch & Gosselink, 2015).

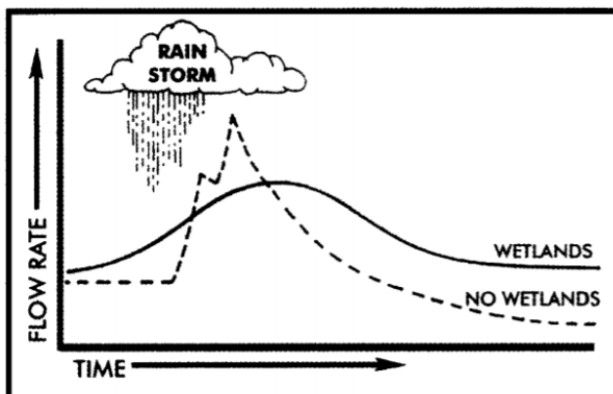


FIGURA N°1: Rol de los humedales en la reducción del peak de crecida de los flujos de aguas pluviales.

Fuente: Kusler (1983).

La capacidad del humedal para controlar las inundaciones dependerá del tipo de humedal y la vegetación, que también cumple el rol de reducir la velocidad de circulación de las aguas de crecida. En un estudio realizado en Estados Unidos se estimó que 0,4 hectáreas de humedal son capaces de almacenar 6.000 m³ de agua de crecida. (Ramsar, 2012). Los humedales costeros en especial, prestan servicios relacionados al control de tormentas y crecidas, en general durante las perturbaciones hídricas. (Corporación de Ambientes Acuáticos de Chile, 2005).

En humedales aledaños a ríos, se observan patrones de comportamiento según la climatología que presenta la cuenca. Para una cuenca de alimentación pluvial, las inundaciones se presentan en los meses de invierno donde las precipitaciones son mayores, generando desborde de los cauces. Un estudio realizado por Novitzki (1985), determinó que las cuencas que presentan humedales en su extensión poseen flujos de inundaciones considerablemente menores que aquellas cuencas sin humedales (Mitsch & Gosselink, 2015). Para el caso de inundaciones fluviales, el humedal intercepta el escurrimiento de los desbordes y almacena las aguas, cambiando así los picos de esorrentía, generando descargas más lentas durante períodos más largos de tiempo. Debido a que son los caudales máximos los que producen mayores daños por inundación, el efecto del área del humedal es reducir

el peligro de inundación al retardar el tiempo y disminuir el flujo máximo. (Mitsch & Gosselink, 2015).

Pese a la serie de beneficios que brindan los humedales, la presión que ejercen las actividades humanas sobre estos ecosistemas ha generado que haya desaparecido más del 64% de éstos desde 1990 a nivel global (Kumar et al., 2017), la transformación y degradación de estos ecosistemas altera la dinámica hídrica, lo que termina por provocar la pérdida o disminución de los servicios que entregan los humedales, como la captación de excesos hídricos en tiempos de crecida (Ríos, 2010); por lo tanto, resulta evidente pensar que la conservación y protección de los humedales permite generar comunidades resilientes y capaces de reaccionar ante eventos de inundación. Un ejemplo de ello es la iniciativa “*Room for the river*” de los Países Bajos, donde han reemplazado la construcción de diques y bermas para la mitigación de inundaciones, por la restauración y habilitación de áreas inundables. (European Environment Agency, 2018). Otro ejemplo es el de Luisiana, Estados Unidos, donde luego de los daños provocados por el Huracán Katrina en 2005, se implementó el Marco de Resiliencia de Luisiana que reconoce la función primordial de los pantanos y humedales de la costa de Luisiana para la salud del Golfo de México y la protección contra huracanes, restaurando espacios como marismas para cumplir una función de barrera protectora entre el mar y la ciudad (Jindal et al., 2015).

Ogawa y Male (1983, 1986) utilizaron un modelo de simulación hidrológica para investigar la relación entre la remoción de humedales aguas arriba y las inundaciones aguas abajo. Su estudio demostró que para las inundaciones con un periodo de retorno de 100 o más años, el aumento en el peak de la corriente fue significativo cuando los humedales fueron removidos. Los autores concluyeron que la utilidad de los humedales en la reducción de las inundaciones aguas abajo aumenta con: (1) un aumento en el área de humedales, (2) la distancia que el humedal está aguas abajo, (3) el tamaño de la inundación, (4) la falta de otras áreas de almacenamiento aguas arriba (Mitsch & Gosselink, 2015).

4.2. INUNDACIONES FLUVIALES

De acuerdo con lo señalado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los patrones de población, la urbanización y los cambios en las condiciones socioeconómicas, han influido en las tendencias observadas en la exposición y vulnerabilidad ante eventos naturales, particularmente por la ocupación y asentamiento informal en territorios susceptibles (IPCC, 2012). El enfoque más común para definir el riesgo de inundación es la definición de riesgo como producto del peligro, es decir, los aspectos físicos y estadísticos de la inundación real (como el período de retorno, la extensión y la profundidad de la crecida) y la vulnerabilidad, es decir, exposición de personas y bienes a inundaciones y la susceptibilidad de los elementos en riesgo de sufrir daños por estos eventos. (Pinos et al., 2017).

El riesgo de inundaciones ha ido incrementando a nivel mundial de forma exponencial en las últimas décadas, básicamente por procesos inducidos por las transformaciones humanas de los sistemas naturales como por el aumento de la vulnerabilidad (Ollero, 1997). Las inundaciones son el peligro natural más frecuente y perjudicial del mundo; sólo entre 1994 y 2013, equivalen al 43% de todos los fenómenos naturales registrados y afectaron a casi 2.500 millones de personas (CRED, 2015).

Comúnmente se suelen utilizar los conceptos de inundación y anegamiento como sinónimos, lo cual puede resultar aceptable en algunos casos; pero en términos de planificación y ordenamiento del territorio es necesario diferenciarlos. Las inundaciones pueden definirse como el resultado del desequilibrio que se manifiesta en un momento, lugar y situación dada, entre el volumen hídrico a evacuar en un período de tiempo y la capacidad de evacuación de los cauces o sistemas de drenaje, correspondiendo a una consecuencia derivada de otros procesos de recurrencia interanual, como crecidas de cursos de agua, en conjunto con condiciones de insuficiencia de los sistemas de evacuación naturales, sistemas de drenaje artificiales o colectores urbanos. En cambio, anegamiento se define como la acumulación temporal de aguas lluvias en una determinada porción de territorio

(Ferrando, 2006). En términos más sencillos, el IPCC define inundación como el rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de esta sobre áreas que, por lo general, no están sumergidas. Las inundaciones pueden ser fluviales, súbitas (*flashfloods*), pluviales, costeras y asociadas con deslizamientos de glaciares. (IPCC, 2012).

Las inundaciones fluviales corresponden a “la invasión de un territorio por el escurrimiento descontrolado de un flujo de un cauce, debido a una crecida. Las aguas desbordan de su cauce habitual, invadiendo el lecho mayor del río o las llanuras de inundación y terrazas inferiores, paleocauces, etc.” (Mardones, 2001). En ocasiones se han utilizado las zonas naturales adyacentes a los cauces, como humedales, para generar zonas de amortiguación.

Crecida e inundación fluvial no deben ser confundidos, la primera corresponde a la ocurrencia de un peak de caudal sin desbordamiento, mientras que la segunda representa la ocurrencia de caudales suficientemente grandes como para salir de su propio cauce (Rojas, 2015). En las inundaciones fluviales intervienen factores condicionantes y detonantes. (Tabla N°4).

Tabla N°4: Factores detonantes y condicionantes de las inundaciones.

Factores detonantes	Factores condicionantes
<ul style="list-style-type: none"> • Precipitaciones continuas • Lluvias intensas de corta duración • Ciclones • Derretimiento de nieve • Marejadas • Rompimiento y liberación de flujos desde presas • Desprendimiento de obstrucciones de hielo 	<ul style="list-style-type: none"> • Características climáticas • Condiciones hidrológicas • Aspectos físicos de la cuenca • Características de los canales de drenaje

Fuente: Modificado de Rojas (2015).

En Chile, las inundaciones se generan por 5 factores: (1) precipitaciones, ya sea por intensidad o persistencia, (2) procesos volcánicos, (3) procesos nivoglaciares, (4) deslizamientos, (5) Intervenciones antrópicas. Una compilación de registros de inundaciones en Chile determinó que la región del Biobío se ve expuesta a sistemas

frontales fríos y cálidos, principalmente en los meses invernales, que pueden generar intensas y persistentes lluvias, las que se traducen en crecidas importantes (Rojas et al., 2014).

Los efectos que provocan las inundaciones pueden clasificarse en naturales y antrópicos; la energía que movilizan puede transformar el paisaje, tanto en el mismo cauce como en las áreas potencialmente inundables. (Sedano, 2012). Los efectos naturales se traducen principalmente en movilización de sedimentos, variación en la geometría y trazado del cauce; además de la muerte de muchas especies en las riberas. Los efectos antrópicos tienen relación con daño a la infraestructura, interrupción de las vías de comunicación, paralización de las actividades productivas, detrimento de la calidad de vida, efectos sobre la salud pública, propagación de epidemias y pérdidas de vidas humanas (Ollero, 1997). De lo anterior, surge la necesidad de analizar las inundaciones desde el punto de vista del riesgo y la amenaza, con el fin de elaborar medidas que aporten a una gestión real del riesgo.

4.2.1. Modelación de inundaciones

Los mapas de zonas inundables permiten comprender de forma gráfica las áreas del territorio propensas a inundarse. Para crear estos mapas es necesario modelar el comportamiento de los cursos fluviales mediante modelos matemáticos e hidrodinámicos apoyados en sistemas de información geográfica.

Los modelos hidráulicos representan las llanuras de inundación y la topografía de los cauces (Castellet et al., 2014); se pueden clasificar en modelos unidimensional, bidimensional o tridimensional, según las variables que se consideren. Siempre es conveniente discernir entre cual es el mejor modelo, contrario a lo que se podría creer, no siempre el mejor modelo es aquel que posee más variables. La modelación en un número mayor de dimensiones no implica necesariamente mejores resultados, pudiendo ser en algún caso contraproducente (Knigth,2013).

Dentro de los modelos de simulación hidráulica los más conocidos o utilizados son los denominados de análisis 1D o unidimensional, donde se considera el río como una línea, en este tipo de modelos la información topográfica e hidráulica se

introduce mediante secciones transversales ortogonales a lo largo del río o canal, situados en los puntos donde mejor se define la geometría del cauce y sus márgenes. Existen tres hipótesis que influyen los resultados del modelo según Castellet et al., (2014):

- El flujo de agua se produce en el sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal.
- La cota de agua es constante en cada sección.
- La velocidad del agua es constante en cada sección.

Sin lugar a duda, el programa referencia en modelos unidimensionales es HEC-RAS, del *Hydrologic-Engineering Center* del *U.S Army Corps of Engineers*.

HEC-RAS es un modelo unidimensional, donde las ecuaciones de conservación de masa y momento son resueltas por un sistema de ecuaciones lineales empleando el esquema de segundo orden de Preissman. (Dyhouse y Benn, 2003). La aplicación del modelo requiere como información de entrada la geometría del canal, condiciones de borde, información de cursos tributarios y características de rugosidad del canal. El modelo ofrece dentro de los resultados el nivel de agua para cada sección transversal modelada. Esto permite realizar un análisis de eventos de inundación (Brunner, 2008). Pese a que el modelo no dispone de herramientas de análisis espacial, los resultados que brinda pueden exportarse a través de una interfaz con herramientas de sistemas de información geográfica.

4.3. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL EN PROCESOS DE INUNDACIÓN

Los procesos de urbanización han generado la ocupación de áreas urbanas o suburbanas que no son adecuadas para vivir, ya que están bajo amenaza de inundación, riesgos sísmicos, geológicos, movimientos de masas, entre otras, que ponen en peligro a la población y sus bienes (Camargo et al., 2020). El manejo y la gestión del territorio para prevenir, mitigar y revertir los impactos provocados por los riesgos naturales, como las inundaciones, debe ser abordado en el marco de políticas públicas de planificación y gestión de los procesos territoriales desde una mirada compleja, interdisciplinaria y multiactoral (Piperno y Sierra, 2007).

En Chile no existe un único instrumento de planificación urbana, sino que múltiples instrumentos que cumplen tal objetivo (Cordero, 2007), entre ellos se encuentran los siguientes: Plan Regional de Desarrollo Urbano, Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano, Plan Regulador Comunal, Plan Seccional y el Límite Urbano. En ellos uno de los componentes más importantes es la zonificación del uso del suelo, que permite visualizar los impactos y consecuencias de los eventos naturales futuros e influenciarlos a través de acciones que generen cambios en el territorio (Camargo, 2010).

La zonificación se expresa a través de mapas, que funcionan como insumo básico para el ordenamiento territorial. En el caso de las inundaciones, se generan mapas de riesgo (equivalentes a peligro) de inundación donde es posible observar zonas con mayor o menor peligrosidad. En términos normativos, la planificación territorial a través de sus instrumentos debe hacerse cargo de aquellas zonas en peligro de inundación, restringiendo el uso de suelo a aquellos que sean aptos con el fin de disminuir las consecuencias derivadas de eventos de inundación.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolla en la comuna de Coronel (37°01'S y 73°08'O), región del Biobío, provincia de Concepción. Específicamente, se aplica en el humedal Boca Maule (36°59'S y 73°10'O), ubicado en el pericentro poniente del área urbana de Coronel. El humedal Boca Maule (Figura 2) es un área de extensión aproximada de 55 hectáreas, se extiende a lo largo del estero Maule, que atraviesa la ciudad de oriente a poniente. Se caracteriza por ser un humedal palustre, ribereño y próximo a su desembocadura, es un área altamente sensible y de alto valor natural y paisajístico, con una riqueza de flora y fauna endémica. (Fuentes, 2013).

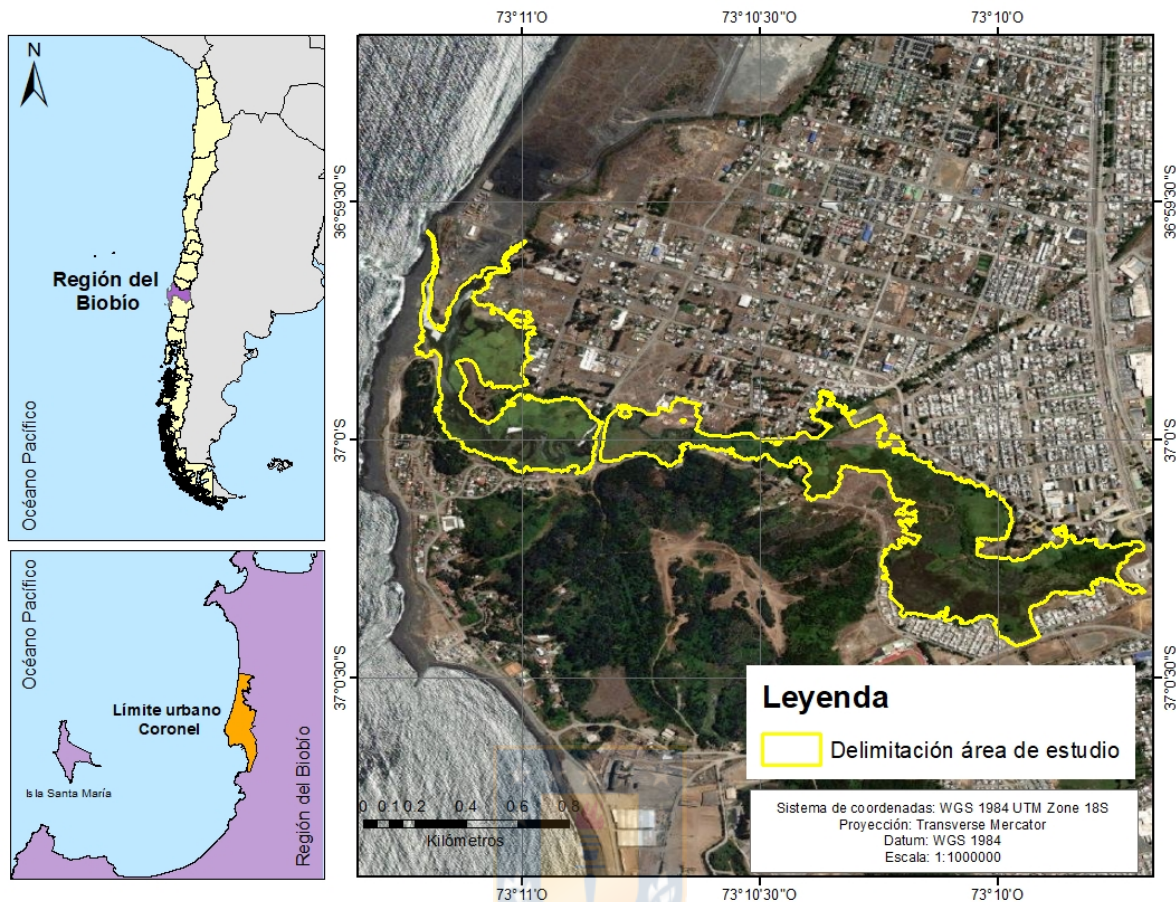


FIGURA N°2: Delimitación área de estudio.

Fuente: Elaboración propia en base a delimitación proyecto URBANCOST II.

La comuna de Coronel se encuentra en el dominio del clima mediterráneo templado de la costa occidental, con una amplitud térmica moderada, actuando como regulador térmico la proximidad con el Océano Pacífico, que influye en las variaciones anuales de temperatura, que oscila entre los 15°C promedio en los meses de verano y los 10°C promedio para los meses de invierno, alcanzando máximas de 26°C en verano y mínimas de 0,4°C en invierno (Plan Maestro de Aguas Lluvias de Lota y Coronel, MOP). Según el Plan Maestro de Recuperación del Humedal Boca Maule, la comuna tiene un promedio anual de precipitación de 1256,2 mm (30 años), las que se concentran en los meses de invierno por la frecuencia de pasaje del frente polar, que determina períodos de tres a cuatro días con precipitaciones más o menos continuas.

La confluencia de los esteros Maule, La Posada y Lagunillas dan origen al Humedal Boca Maule. (Figura 3). Estos esteros son parte de las microcuencas más importantes de la vertiente occidental del macizo cordillerano costero. Presentan escorrentías superficiales durante gran parte del año. En general, son de anchos homogéneos que oscilan entre 15 y 30 metros, en su mayoría modelados por intervenciones antrópicas derivados de procesos de urbanización. No obstante, en temporada de invierno, tienen tendencia a frecuentes desbordes e inundaciones a lo largo de sus trayectorias por el exceso de lluvias, generando pequeños humedales y lagunas con niveles freáticos próximos a la superficie. (Municipalidad de Coronel, 2012).



FIGURA N°3: Principales cursos hídricos que alimentan el humedal Boca Maule.

Fuente: Modificado de Plan Maestro de Recuperación Humedal Boca Maule.

5.2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la investigación, se establecieron tres objetivos. En primer lugar, se realizó un análisis bibliográfico para comparar la normativa urbana de planificación territorial que zonifica el humedal con criterios urbanos internacionales de planificación urbana (OE1) asociados al peligro de inundaciones. En segundo lugar, se realizó un análisis hidrológico a través de métodos directos e indirectos para la obtención de caudales máximos (OE2). Posteriormente, se utilizó el software HEC-RAS 5.0.7 para la modelación de zonas de inundación para diferentes

períodos de retorno (T2, T10, T50 y T100), las que fueron contrastadas (OE3) con la zonificación de los instrumentos de planificación territorial vigentes (OE1).

En la figura 4, se presenta un diagrama de integración metodológica que describe lo anterior.

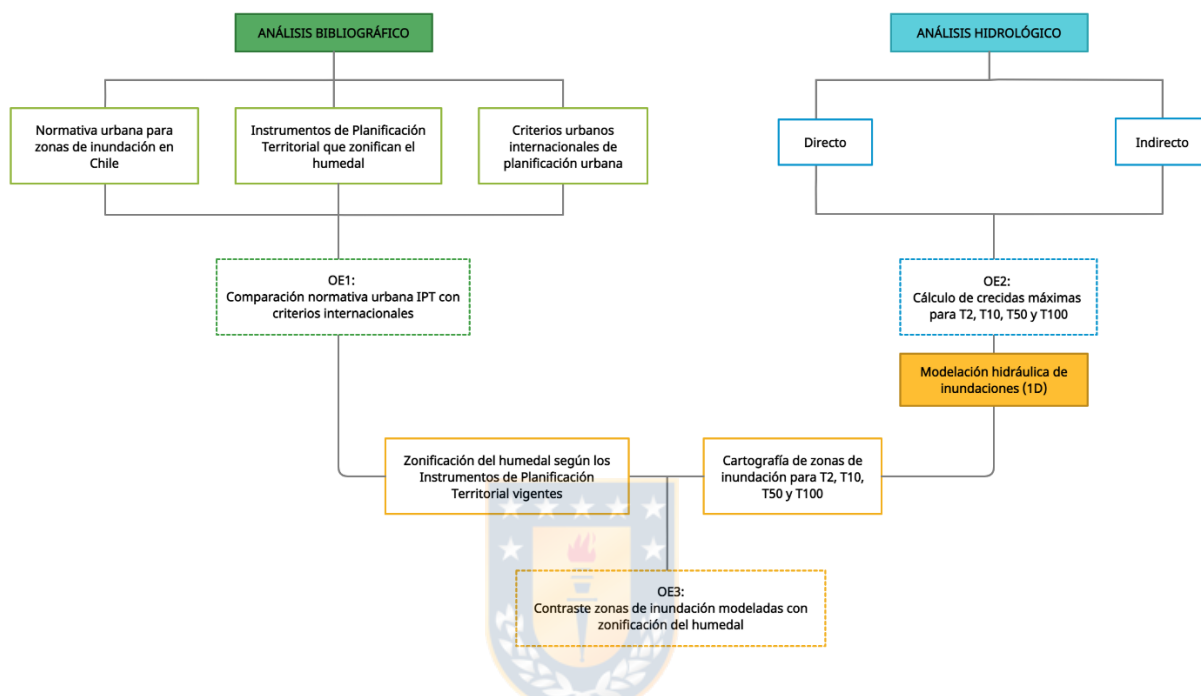


FIGURA N°4: Diagrama de integración metodológica.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. COMPARAR LA NORMATIVA URBANA DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL DEL HUMEDAL BOCA MAULE CON CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA

La metodología para comparar la normativa urbana de planificación territorial del humedal con criterios internacionales de planificación urbana (Figura 5) se dividió en tres actividades principales:

- En primer lugar, se realizó una búsqueda de normativas aplicadas para regular y zonificar el peligro de inundación en Chile, donde se analizó la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que entregan las directrices para que los Planes Reguladores puedan establecer los usos permitidos de las áreas

de riesgo (Art. 2.1.17 de la OGUC). Además, se analizaron ejemplos comunales de Planes Reguladores de las comunas de Copiapó y San Pedro de la Paz, ambos de reciente modificación, donde se ha incorporado un mayor análisis de las zonas de inundación.

- En segundo lugar, se analizaron los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) vigentes que influyen en el humedal en formato shp., a través del software ArcGis 10.4.1, donde fue posible observar la zonificación del humedal disponible en la tabla de atributos. A nivel intercomunal se analizó la zonificación del Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC), que tiene una ordenanza vigente desde el año 2003, la cual desde el año 2017 se encuentra en evaluación para su modificación. A nivel comunal se analizó la zonificación del Plan Regulador Comunal de Coronel (PRC), que fue reformulado por última vez el año 2013.

En ambos instrumentos se calcularon las superficies en hectáreas para la zonificación presente en el humedal, para lo cual se realizó un buffer de 300 metros alrededor de la delimitación definida por el proyecto Fondecyt URBANCOST II, con el fin de obtener un área de influencia que abarque los usos permitidos de ambos instrumentos de planificación para el humedal.

Los resultados se expresaron a través de cartografía y tablas que muestran la zonificación y gráficos que muestran los porcentajes de uso de suelo permitido.

- En tercer lugar, se realizó una búsqueda de criterios internacionales de planificación urbana (zonificación y usos permitidos) en Reino Unido, España y Estados Unidos, referente a inundaciones, ya que al ser países propensos a sufrir eventos de inundación, han incorporado el análisis del peligro de inundación en la planificación del territorio. Se analizó el documento “*Technical Guidance to the National Planning Policy Framework*” (Orientación Técnica para el Marco de Políticas de Planificación Nacional) en el caso de Reino Unido; el Plan de Ordenación Territorial (POT) del Gobierno de Navarra en el caso de España y una serie de documentos de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por su sigla en inglés) de Estados Unidos.

La información de cada país se resumió en tablas, donde se indican niveles de riesgo asociados a zonas de inundación, períodos de retorno y/o probabilidad anual de inundación, usos de suelo permitidos y criterios considerados, como velocidad o profundidad de inundación.

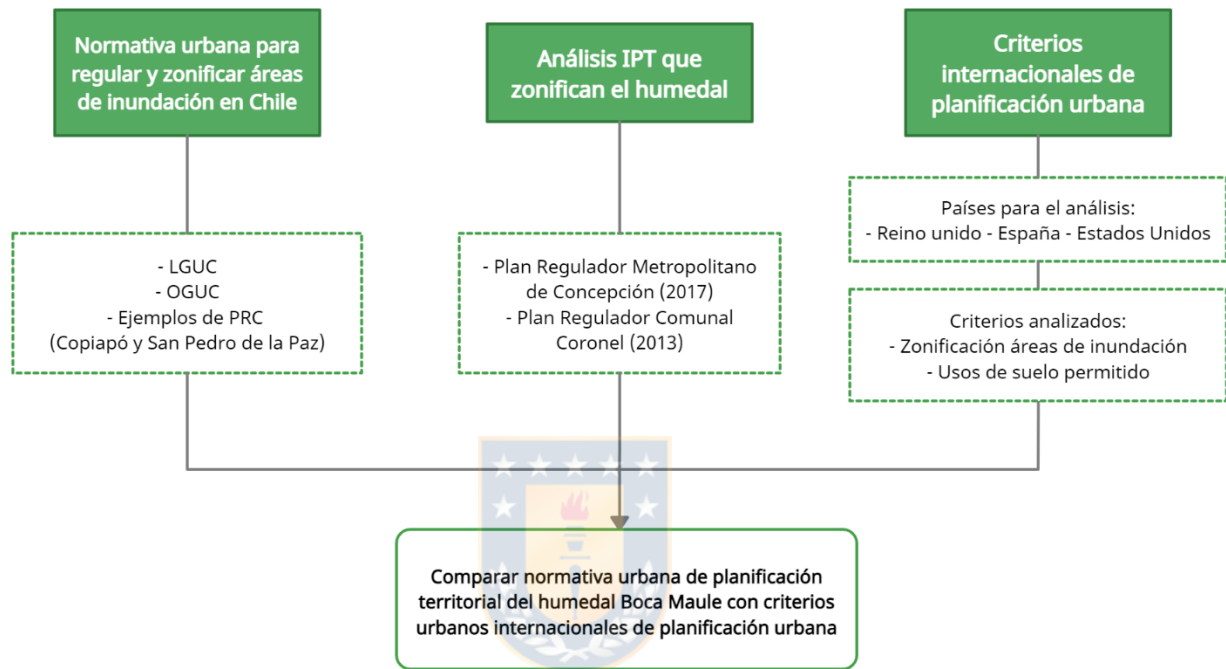


FIGURA N°5: Síntesis metodológica.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. CALCULAR CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Para el cálculo de los caudales máximos para períodos de retorno de hasta 100 años, se utilizó la metodología propuesta por el “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” de la Dirección General de Aguas (MOP-DGA, 1995), junto al estudio de “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días” (MOP-DGA, 1991). Las precipitaciones máximas se obtuvieron de la estación Carriel Sur (Código Nacional 360019, DMC), la cual cuenta con registros desde 1968 a la actualidad. Además, para validar los resultados obtenidos de los métodos propuestos, se utilizaron las estaciones fluviométricas Estero Bellavista en

Tomé y Estero Nonguén frente a Universidad del Biobío, por ser similar en cuanto a hidrología y usos de suelo con la cuenca de estudio.

Entre los métodos utilizados para el cálculo de caudales instantáneos máximos están el DGA-AC, Verni y King modificado y Fórmula Racional; todos estos válidos para cuencas pluviales entre 20 y 10.000 km² y estaciones comprendidas entre la III y IX región, para el cálculo de períodos de retorno de hasta 100 años. A continuación, se describe la obtención de la precipitación y los caudales máximos para los tres métodos anteriores. Esta metodología se aplicó para cada uno de los esteros que alimentan el humedal, que son Estero Maule, Estero La Posada y Estero Lagunillas.

➤ **Determinación de la precipitación diaria máxima de período de retorno de 10 años**

Un requisito para el uso de los tres métodos propuestos es la precipitación máxima en 24 hrs (P_{24}^{10}), la cual se determinó haciendo uso de la información de precipitación máxima anual obtenida a través de la estación Carriel Sur. Se decidió trabajar con esta estación por la cantidad de años de registro y su influencia dentro de la cuenca, la cual fue medida a través del método polígonos de Thiessen en el software ArcGIS en su versión 10.4.1. Los datos de precipitación máxima obtenidos de la estación fueron procesados a través de EasyFit 5.5, donde se realizó un análisis de frecuencia, lo que permitió ajustar una distribución de probabilidad teórica a datos independientes, con ella se obtuvo el valor de (P_{24}^T) para diferentes períodos de retorno, comprobando su calidad de ajuste mediante test de bondad (Chi cuadrado, Kolmogorov Smirnov y Anderson Darling). Una vez evaluadas y seleccionadas las distribuciones más aceptadas, se compararon con las isoyetas (P_{24}^{10}) de referencia obtenidas por el MOP-DGA en el estudio “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días” para validar tal resultado.

➤ **Método DGA-AC**

El método DGA-AC está calibrado y validado en base a la información de 234 estaciones fluviométricas entre la III y la IX región. Consiste en determinar una curva

de frecuencias para el caudal instantáneo máximo en base al procedimiento esquematizado en la figura 6.

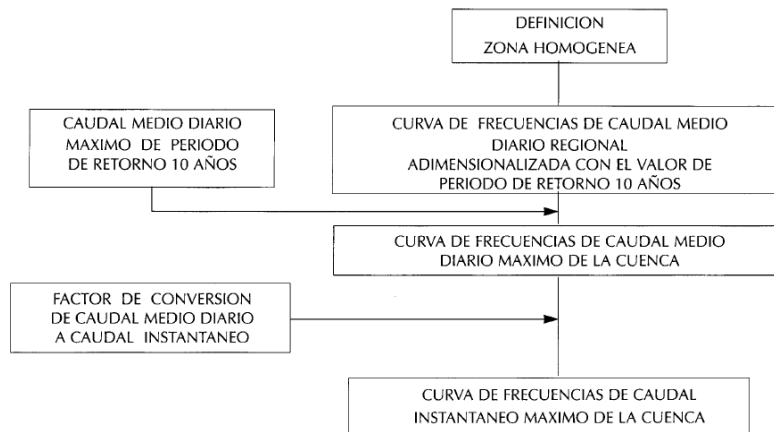


FIGURA N°6: Esquema de cálculo del método DGA-AC para caudales instantáneos máximos pluviales.

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Definición de zona homogénea**

La ubicación de la zona homogénea a la cual pertenece la cuenca se determinó en base a la figura 7, la cual caracteriza a las cuencas según su latitud.

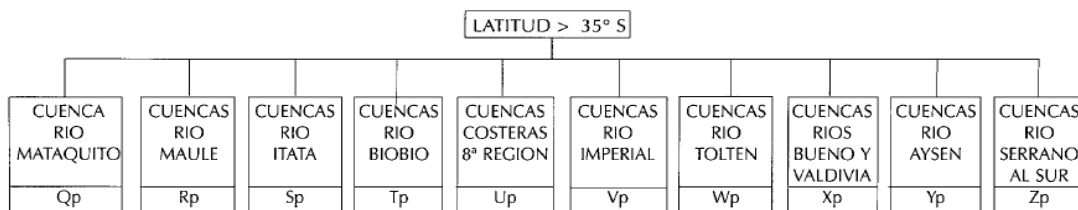


FIGURA N°7: Zonas homogéneas ubicadas al sur de la latitud 35°S.

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Determinación del caudal medio diario máximo de período de retorno 10 años**

A partir de la determinación de la zona homogénea, el manual define la curva de frecuencia regional de caudales medios diarios máximos. Para este caso particular, se define como

zona homogénea Up Cuenca Costera VIII región, obtenida por la distribución Gumbel y visible en la tabla N°5.

Tabla N°5: Curva de frecuencia regional caudales medios diarios máximos zona homogénea Up pluvial – Gumbel – VIII región – C. Costera.

PERIODO DE RETORNO "T" (años)	Q(T)/Q(10)		
	MEDIA	MAX	MIN
2	0,57	0,63	0,50
5	0,83	0,85	0,80
10	1,00	1,00	1,00
20	1,16	1,19	1,14
25	1,22	1,25	1,19
50	1,38	1,44	1,33
75	1,47	1,55	1,41
100	1,54	1,63	1,46

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométrica" (MOP-DGA, 1995).

- **Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo**

Para aplicar el método se requiere conocer el caudal medio diario máximo de período de retorno de 10 años (Q_{10}), este se obtiene mediante la ecuación N°1, que depende de la región en la que se ubica la cuenca.

$$\text{VII a IX Región} \quad Q_{10} = 2 \times 10^{-3} A_p^{0,973} (P_{24}^{10})^{1,224} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (\text{ec. 1})$$

Donde:

Q_{10} : Caudal medio diario máximo de períodos de retorno 10 años, expresado en m^3/s .

A_p : Área pluvial de la cuenca expresada en km^2 .

P_{24}^{10} : Precipitación diaria máxima de período de retorno 10 años, expresada en mm.

Finalmente, para hacer la conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo se utilizó un factor que depende de la zona homogénea a la que pertenece la cuenca, según la tabla N°6.

Tabla N°6: Factores de conversión de caudal medio diario máximo a caudal instantáneo máximo.

Zona homogénea	<i>a</i>	Zona homogénea	<i>a</i>	Zona homogénea	<i>a</i>
Dp	2,19	Lp	1,67	Tp	1,28
Ep	1,13	Mp	1,48	Up	1,2-1,5
Fp	3,07	Np	1,87	Vp	1,16
Gp	1,40	Op	1,76	Wp	1,19
Hp	1,13	Pp	1,43	Xp	1,22
Ip	1,25	Qp	1,51	Yp	1,27
Jp	2,14	Rp	1,45	Zp	1,24
Kp	1,59	Sp	1,37		

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

➤ Método Verni y King modificado

Este método está basado en la fórmula de Verni y King, que relaciona el caudal máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial a través de una relación de potencias, diferenciado por el uso de un coeficiente asociado al período de retorno, que es producto de un proceso de ajuste y calibración a los resultados de análisis de frecuencia de 130 estaciones limnigráficas, quedando expresado según la ecuación N°2.

$$Q = C(T) * 0,00618 * P_{24}^{1,24} * A_p^{0,88} \quad (\text{ec. 2})$$

Donde:

Q : Caudal instantáneo máximo asociado a períodos de retorno T años, expresado en m³/s.

$C(T)$: Coeficiente empírico de período de retorno T años.

P_{24} : Precipitación diaria máxima de período de retorno de T años, expresada en mm.

A_p : Área pluvial de la cuenca, expresada en km².

El método consiste en determinar el coeficiente empírico de ajuste y calibración para luego aplicar la fórmula directamente. El procedimiento queda esquematizado en la figura 8.

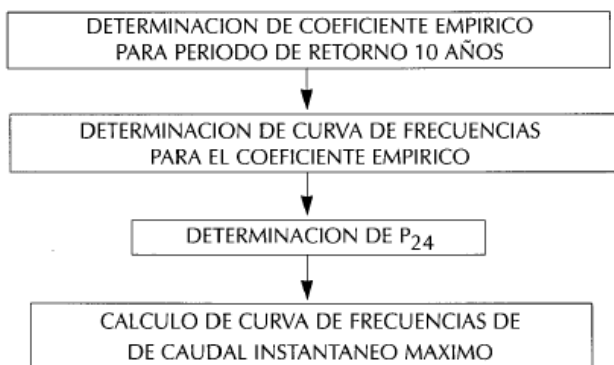


FIGURA N°8: Esquema de cálculo del método Verni y King modificado.

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Determinación del coeficiente empírico de período de retorno de 10 años.**

Este coeficiente depende de la región en que se encuentra la cuenca, los valores se muestran en la siguiente tabla.

Tabla N°7: Coeficiente C (T=10 años) Fórmula Verni y King modificado.

Región	C (T=10)
III	0,027
IV - Cuenca Elqui	0,057
IV - Cuenca Limarí	0,180
IV - Cuenca Choapa	0,200
V	0,290
VI	0,680
VII	0,710
VIII	0,790
IX	0,890

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Determinación de curva de frecuencia del coeficiente empírico**

El coeficiente empírico C(T) es función del período de retorno. Este se obtuvo mediante el cálculo del factor de frecuencia C(T) / C (T=10 y luego multiplicando este por el coeficiente asociado al período de retorno 10 años de la tabla anterior. Los coeficientes C(T)/C(T=10) se muestran en la tabla N°8.

Tabla N°8: Coeficientes de fórmulas empíricas.

Período Retorno T (años)	C(T)/C(T=10)
	VIII Región
2	1,04
5	1,04
10	0,91
20	0,99
25	1,00
50	1,01
100	1,02

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

Finalmente, para obtener el caudal instantáneo máximo de período de retorno T deseado, se determinaron todas las variables que definen la ecuación N°2.

➤ **Fórmula racional**

Este método incluye la información de 130 estaciones limnigráficas y consiste en determinar el coeficiente de escorrentía que es función del período de retorno, la ubicación de la cuenca y la intensidad de la lluvia. Este procedimiento se muestra en la figura 9.

La expresión para determinar el caudal instantáneo máximo de período de retorno T es:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

Q: Caudal instantáneo máximo de período de retorno T, expresado en m^3/s .

C: Coeficiente de escorrentía asociado al período de retorno T.

I : Intensidad media de lluvia asociada al período de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial, expresada en mm/hr.

A : Área pluvial aportante, expresada en km^2

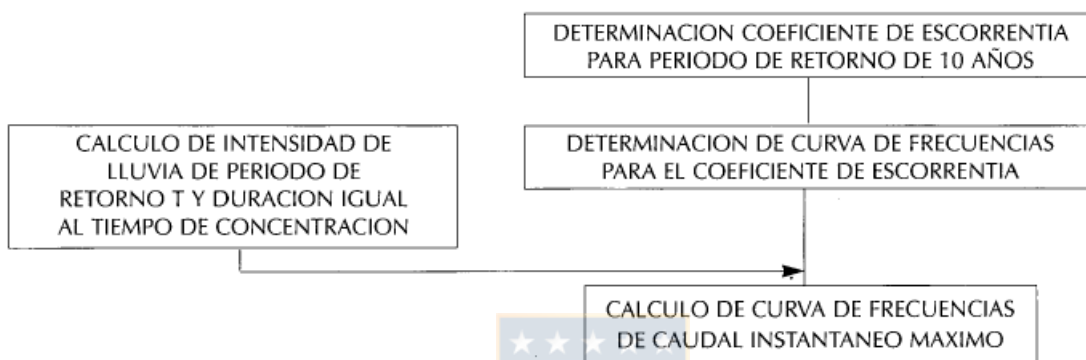


FIGURA N°9: Esquema de cálculo de la fórmula racional.

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información pluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Determinación del coeficiente de escorrentía de período de retorno 10**

El coeficiente se determina según la ubicación geográfica de la cuenca y su uso es exclusivo de cuencas rurales, en la siguiente tabla es posible ver los valores.

Tabla N°9: Coeficiente C(T=10) Fórmula Racional.

Región	C(T=10)
III	0,009
IV – Cuenca Elqui	0,025
IV – Cuenca Limarí	0,078
IV – Cuenca Choapa	0,080
V	0,080
VI	0,310

VII	0,390
VIII	0,360
IX	0,280

Fuente: Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica” (MOP-DGA, 1995).

- **Determinación de la curva de frecuencia del coeficiente de escorrentía**

Para determinar el coeficiente se utilizaron los valores expuestos en la tabla N°8, correspondiente al método Verni y King modificado.

- **Determinación del caudal instantáneo máximo de período de retorno T**

Luego de obtener las variables anteriores se pudo aplicar la ecuación N°3 para el período de retorno T.

- **Comparación de métodos y validación bibliográfica**

Al obtener los resultados de caudal para los tres métodos propuestos por el manual, se procedió a comparar los flujos para cada período de retorno, con los flujos máximos obtenidos a través de métodos directos, desde el análisis de frecuencia de las estaciones fluviométricas Estero Bellavista en Tomé y Estero Nonguén frente a Universidad del Biobío, correspondientes a las subcuencas Costeras entre río Pingüeral y Andalién y río Andalién, respectivamente. Cuencas que son hidrológicamente similar al área de estudio, donde la estación hidrometereológica Carriel Sur también tiene influencia.

Con la comparación fue posible determinar cuál método representa mejor el comportamiento de las crecidas para cada uno de los esteros que alimentan el humedal.

5.2.3. CONTRASTAR ZONAS DE INUNDACIÓN MODELADAS CON LAS ZONIFICACIONES DE LOS INSTRUMENTOS DE PLANIFICIACIÓN TERRITORIAL

Para determinar zonas de inundación asociadas al área de estudio, se realizó una simulación de la extensión de inundación, a través de modelaciones hidráulicas para diferentes períodos de retorno, entendiendo el período de retorno como la probabilidad de ocurrencia de un evento que iguala o excede una magnitud determinada. Estas zonas de inundación se expresaron en cartografías para facilitar su comparación con la zonificación del humedal, presente en el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (2017) y el Plan Regulador Comunal de Coronel. (2013).

➤ Modelación de inundaciones

La simulación correspondió a una modelación hidráulica en 1D o unidimensional, realizada para períodos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años, a través del software HEC-RAS 5.0.7 y ArcGIS 10.4.1 con el complemento HEC-GeoRAS 10.4.

El modelamiento hidráulico consta de tres etapas: el pre-procesamiento y preparación de los datos (pre-RAS), el modelamiento hidráulico en HEC-RAS y el post-procesamiento de los datos. La figura 10 muestra el procedimiento para realizar la modelación.

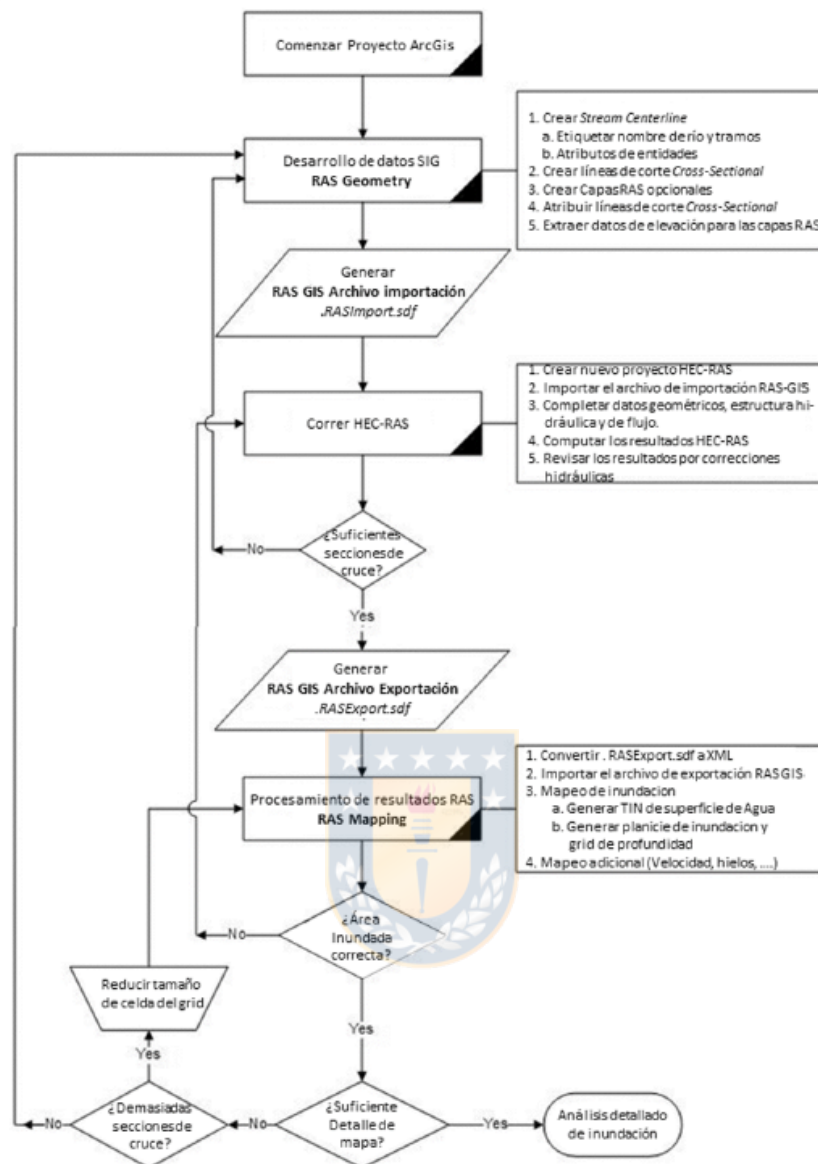


FIGURA N°10: Pasos de ejecución del software HEC-RAS en conjunto con ArcGIS y HEC-GeoRAS.

Fuente: Adaptación de Bruner, 2016.

La información base sobre la que se trabajó, corresponde a una imagen LIDAR (Proyecto URBANCOST II), insumo que permite obtener modelos de elevación digital con gran exactitud, con vuelos realizados al año 2012 y 2015, cuyas modificaciones topográficas y batimétricas fueron corregidas, el ráster quedó definido con un tamaño de celda de 1 x 1 m. Con el ráster y el complemento HEC-

GeoRAS se creó la información que posteriormente fue exportada a HEC-RAS, donde se realizó el trazado del cauce, perfiles transversales y llanura de inundación para el humedal y cada uno de los esteros, la tabla N°10 muestra la longitud del cauce, el número de perfiles transversales y distancia entre ellos.

Tabla N°10: Información creada en el entorno HEC-GeoRas.

Cauce	Longitud del cauce (km)	N° de perfiles transversales	Distancia aproximada entre perfiles (m)	Ancho aproximado de perfiles (m)
Humedal	3.7	37	80-150	400-500
Estero Maule	0.81	5	150	80-120
Estero Lagunillas	0.76	5	100	60-100
Estero La Posada	0.61	5	80	55-100

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de modelación se realizó en el entorno HEC-RAS, donde se importaron los datos geométricos creados en el proceso previo y se añadió la información hidrológica calculada mediante métodos indirectos, como se describe en el objetivo 1 de esta investigación.

Se consideraron dos valores de rugosidad de Manning, 0.05 para las riberas izquierda y derecha y 0.045 para el canal, para cada estero y el humedal. Se usaron los valores de rugosidad expresados en la tabla N°11, que muestra rangos para diferentes superficies recomendados por HEC-RAS en sus tablas de ayuda. Como condición de borde se utilizó la pendiente de cada uno de los cauces.

Tabla N°11: Valores de rugosidad recomendados por tablas de ayuda de HEC-RAS.

Descripción de la corriente	Rango de rugosidad
A. Cauces naturales	
- Limpias, orillas rectas, fondo uniforme, altura de lámina de agua suficiente, algo de vegetación.	0.033-0.04
- Limpios, meandros, embalses y remolinos de poca importancia	0.035-0.05
B. Cunetas y canales sin revestir	
- En tierra con ligera vegetación	0.035-0.045
- En tierra con vegetación espesa	0.04-0.05

Fuente: Modificado de Mora y Ochoa, 2016.

La calibración del modelo se obtuvo mediante un análisis de sensibilidad de los coeficientes de rugosidad, proceso realizado de forma iterativa hasta obtener una variación milimétrica en la altura del agua en el entorno HEC-RAS.

La validación del modelo se realizó a través del levantamiento en terreno de puntos con GPS cartográfico (FIGURA N°11), donde se determinó la ocurrencia de eventos de inundación en pequeñas zonas residenciales distribuidas alrededor del humedal, consultando a los habitantes si recordaban inundaciones producto del desborde de los cauces.

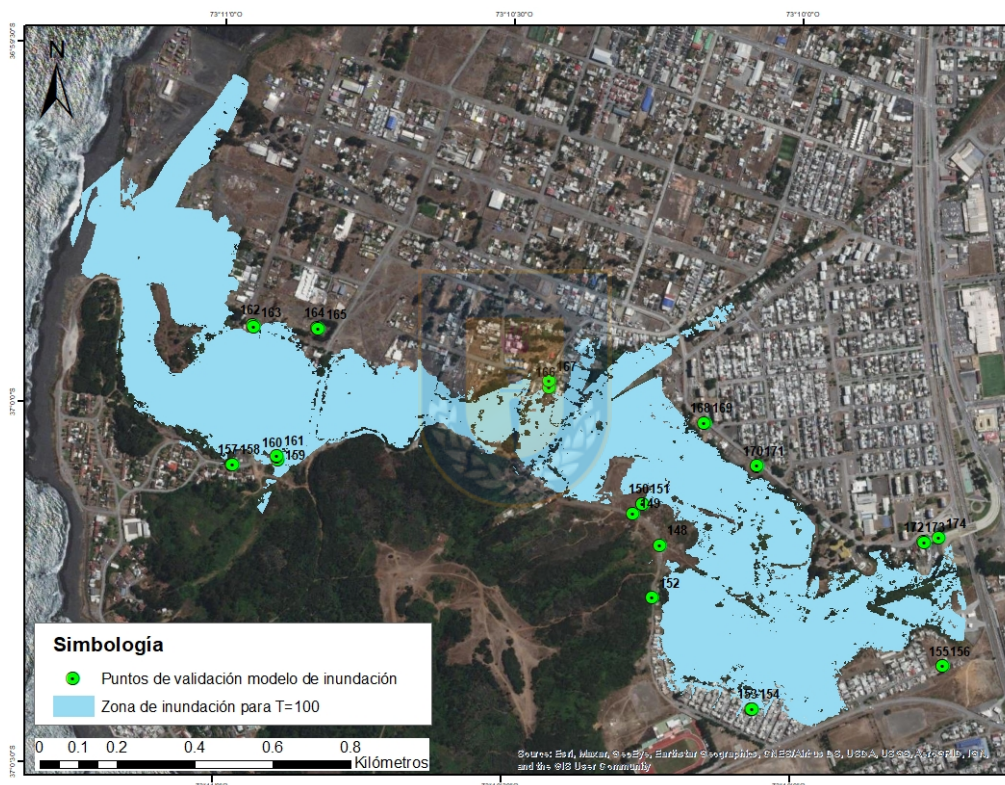


FIGURA N°11: Puntos de validación del modelo de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de correr el modelo, se generó un archivo de exportación para visualizar la extensión de inundación para los períodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años en el entorno ArcGIS, donde fue posible elaborar cartografía.

➤ **Comparación de zonas de inundación modeladas con la zonificación de los Instrumentos de Planificación Territorial**

Para realizar la comparación de las zonas de inundación modeladas con la zonificación del humedal presente en el Plan Regulador Comunal de Coronel y el Plan Regulador Metropolitano de Concepción, se consideraron las inundaciones para períodos de retorno 2 y 100 años, siendo el primero el escenario más probable y el segundo el escenario más extremo. En cada caso, se calculó la superficie en hectáreas de la zonificación afectada por inundaciones, los resultados se expresaron en cartografías para facilitar la comparación.

6. RESULTADOS

6.1. COMPARACIÓN DE LA NORMATIVA URBANA DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL DEL HUMEDAL BOCA MAULE CON CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA.

6.1.1. REGULACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN EN CHILE

Para comprender como funciona la regulación de las zonas de inundación en Chile se describe a continuación la Ley General de Urbanismo y Construcciones y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Además, se analizan ejemplos de Planes Reguladores Comunales de las comunas de Copiapó y San Pedro de la Paz.

6.1.1.1. Ley General de Urbanismo y Construcciones y Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones

La Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC) es el cuerpo legal que contiene los principios, atribuciones, potestades, facultades, responsabilidades, derechos, sanciones y demás normas que rigen a los organismos, funcionarios, profesionales y particulares en las acciones de planificación urbana, urbanización y las construcciones que se desarrollen en todo el territorio de la nación (Art. 1° y 2° LGUC). La ley actúa a través de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), que es reglamento de la LGUC y regula los

procedimientos administrativos, el proceso de la planificación urbana, la urbanización de los terrenos, la construcción y los estándares técnicos de diseño y construcción exigibles en la urbanización y la construcción (Art. 2° LGUC).

La OGUC establece dentro de sus disposiciones, áreas que podrán ser restringidas al desarrollo urbano dentro de los planes reguladores, por constituir un peligro potencial para los asentamientos humanos. Dichas áreas restringidas podrán ser consideradas “zonas no edificables” o bien “áreas de riesgo” (Artículo 2.1.17).

Por zonas no edificables, se entenderán aquellas que por su especial naturaleza y ubicación no son susceptibles de edificación, en virtud de lo preceptuado en el inciso primero del artículo 60° de la LGUC. En estas áreas solo se aceptará la ubicación de actividades transitorias. La ley 21.202 de Humedales Urbanos, que modifica diversos cuerpos legales con el objetivo de proteger ecosistemas de humedal insertos en áreas urbanas, incorpora un tercer inciso al artículo 60° de la LGUC, el cual establece que todo instrumento de planificación territorial deberá incluir los humedales urbanos existentes en cada escala territorial en calidad de área de protección de valor natural, para efectos de establecer las condiciones bajo las que deberán otorgarse permisos de urbanizaciones o construcciones que se desarrollen en ellos.

Por áreas de riesgo (tabla N°12), se entenderán aquellos territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limite determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos.

Para autorizar proyectos a emplazarse en áreas de riesgo, se requerirá que se acompañe a la respectiva solicitud de permiso de edificación un estudio fundado, elaborado por un profesional especialista y aprobado por el organismo competente, que determine las acciones que deberán ejecutarse para su utilización, incluida la Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, conforme a la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, cuando corresponda. Este tipo de proyectos podrá recibirse parcial o totalmente en la medida que se hubieren ejecutado las

acciones indicadas en el referido estudio. En estas áreas, el plan regulador establecerá las normas urbanísticas aplicables a los proyectos una vez que cumplan con los requisitos establecidos en este inciso.

Las áreas de riesgo se determinarán en base a las siguientes características:

- Zonas inundables o potencialmente inundables, debido, entre otras causas, a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
- Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
- Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
- Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.

Tabla N°12: Áreas de riesgo definidas por la OGUC (Art. 2.1.17).

Áreas de riesgo (OGUC)		Amenaza	Origen
Zonas inundables o potencialmente inundables	Maremotos o tsunamis	Maremoto o tsunami	Geológico
	Proximidad a ríos, esteros, cursos de agua no canalizados	Inundación o anegamiento	Hidrometeorológico
	Proximidad a Napa freática o pantanos	Anegamiento	

Fuente: Elaboración propia en base a Art. 2.1.17 de la OGUC.

6.1.1.2. Ejemplos de aplicación en planes reguladores de reciente modificación

A continuación, se analizan los Planes Reguladores Comunales de Copiapó y San Pedro de la Paz.

➤ Plan Regulador Comunal de Copiapó

La comuna de Copiapó, perteneciente a la región de Atacama, cuenta con un PRC desde el año 2002, desde el 2019 se encuentra realizando su última modificación, donde se incorpora un mayor análisis en cuanto al estudio de riesgos naturales, ya que el PRC del año 2002 no incorporaba áreas de riesgo en la zonificación.

Dentro de ese estudio, los peligros de inundación por desborde de río quedan expresados como zonas inundables o potencialmente inundables.

Para la definición del peligro de inundación se realizó una modelación numérica de las crecidas del río Copiapó para períodos de retorno de hasta 100 años, con el aporte de las cuencas de los ríos Jorquera, Pulido, Manflas y Copiapó. Los resultados de esta modelación generaron profundidades que fluctúan entre el rango bajo y muy alto de inundación. Las zonas de peligro de inundación quedaron definidas a través de cuatro niveles de peligrosidad usando como criterio la profundidad, como se muestra en la tabla N°13.

Tabla N°13: Zonas de peligro de inundación según profundidad.

Nivel de peligro	Profundidad (cm)
Bajo	<25
Medio	Entre 25 y 50
Alto	Entre 50 y 100
Muy Alto	>100

Fuente: elaboración propia en base a Estudio de Riesgos. (Municipalidad de Copiapó).

Las recomendaciones vinculadas con medidas no estructurales y transversales a la gradualidad del peligro de inundación son las que se muestran en la tabla N°14.

Tabla N°14: Recomendaciones para zonas de peligro de inundación.

Nivel de peligro	Recomendaciones
Bajo – Peligro y riesgo aceptable. Solucionando con autogestión y obras urbanas de gestión local.	Sin restricción. ➤ De Planificación: Espacio público y áreas verdes Faja vial debe actuar como conductora de flujos a canalizaciones controladas, permitir la evacuación hacia áreas seguras y darle un tratamiento que favorezca la infiltración de los flujos de agua.
Medio – La solución debe estar dada por obras de mitigación de encausamiento.	➤ De Planificación: a) Garantizar que la planificación contenga elementos en su diseño que favorezcan la posibilidad de realizar mitigaciones.

	<p>b) Controlar la densidad de disminuir la exposición de viviendas y edificaciones estratégicas.</p> <p>c) Establecer una estructura vial y darle un tratamiento amortiguador, a través, por ejemplo, de una faja verde aledaña a la vía, de tal forma que funcione como vía de evacuación.</p> <p>Espacio público y áreas verdes. Faja vial:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Debe actuar como conductora de flujos a canalizaciones controladas. - Permitir la evacuación hacia áreas seguras. - Darle un tratamiento que favorezca la infiltración de los flujos de agua.
<p>Alto – Cualquier intervención requiere de obras de mitigación de gran envergadura y de inversión de alcance que exceden la exigencia y capacidad del propio proyecto.</p>	<p>➤ De Gestión:</p> <p>a) La nueva estructura urbana debe incorporar obras de mitigación que reduzcan el riesgo.</p> <p>b) Para permitir vivienda, la planificación debe señalar obras de mitigación asociadas a un diseño vial que actúe como encausamiento.</p> <p>➤ De planificación:</p> <p>a) Garantizar que la planificación contenga elementos en su diseño que favorezca la posibilidad de realizar mitigaciones.</p> <p>b) Ordenar la estructura vial y darle un tratamiento amortiguador, a través, por ejemplo, de una faja verde aledaña a la vía, de tal forma que funcione como vía de evacuación.</p> <p>En sectores no consolidados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No permitir actividades que impliquen permanencia de personas en sitios que excedan la capacidad de recuperación en un mediano plazo. - Para permitir vivienda, la planificación debe diseñar obras de mitigación asociadas a un diseño vial que actúe como encauzamiento (El Plan debe hacer una reserva vial para diseñar obras de encauzamiento o de descarga de flujos).

	<p>En sectores consolidados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Controlar la densidad para disminuir la exposición de viviendas y edificaciones estratégicas. - Dar preferencia a usos de suelo no residenciales. <p>Espacio público y áreas verdes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinar fajas verdes en vialidad que acompañen cauces. - Asegurar destino preferente de espacio público alledaño a los cauces (que den cabida por ejemplo a parques inundables) <p>Faja vial debe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Actuar como conductora de flujos a canalizaciones controladas. - Permitir la evacuación hacia áreas seguras.
<p>Muy alto – El grado de daño es tan alto que hace completamente restrictiva la ocupación de suelo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ De Gestión: Reubicación de viviendas, edificaciones estratégicas. ➤ De Planificación: <ul style="list-style-type: none"> a) Garantizar que la planificación contenga elementos en su diseño que favorezcan la factibilidad de realizar mitigaciones. b) Prohibir actividades que impliquen permanencia de personas en sitios que excedan la capacidad de recuperación en un mediano plazo, tanto para edificaciones estratégicas como para viviendas. <p>Espacio público y áreas verdes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ordenar la estructura vial y darle un tratamiento amortiguador, a través por ejemplo de una faja verde alledaña a la vía, de tal forma que funcione como vía de evacuación. - Determinar fajas viales que acompañen cauces. - Asegurar destino preferente de espacio público alledaño a los cauces (que den cabida, por ejemplo, a parques inundables). <ul style="list-style-type: none"> ➤ De manejo de la emergencia Escenario de peligro imposibilita evacuación en caso de desastre.

Fuente: Modificado de Estudio de Riesgos. (Municipalidad de Copiapó).

➤ **Plan Regulador Comunal de San Pedro de la Paz**

La comuna de San Pedro de la Paz, perteneciente a la región del Biobío, cuenta con un PRC vigente desde el año 2011, actualmente se encuentra desarrollando su última modificación.

En la zonificación del PRC se reconocen dos zonas de riesgos de inundación, identificadas como zonas ZRI-1 y ZRI-2, las normas urbanísticas asociadas a estas zonas se resumen en las tablas N°15 y N°16, respectivamente.

Tabla N°15: Normas urbanísticas de la zona ZRI-1.

Usos de suelo	
Permitidos	Prohibidos
Esparcimiento – sólo parques zoológicos y de entretenimientos	Residencial, actividades productivas, equipamiento (científico, comercio, culto y cultura, deporte, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios, social)
Condiciones de subdivisión y edificación	
Superficie predial media	10.000 m ²
Coef. Máximo de ocupación de suelo	0.01
Coef. Máximo de constructibilidad	0.01
Altura máxima de edificación	7.5
Sistema de agrupamiento	No se permite
Adosamiento	No se permite
Densidad habitacional máxima bruta	No se exige
Condiciones especiales	Se deberán considerar estudios de riesgo de conformidad a lo establecido al artículo 7 de la ordenanza

Fuente: Municipalidad de San Pedro de la Paz (2011).

Tabla N°16: Normas urbanísticas de la zona ZRI-2.

Usos de suelo	
Permitidos	Prohibidos
Deporte – sólo multicanchas y piscinas Esparcimiento – sólo parques zoológicos y de entretenimientos	Residencial, actividades productivas, equipamiento (científico, comercio, culto y cultura, deporte, educación,

	esparcimiento, salud, seguridad, servicios, social)
Condiciones de subdivisión y edificación	
Superficie predial mínima	5000 m ²
Coef. Máximo de ocupación de suelo	0.02
Coef. Máximo de constructibilidad	0.02
Altura máxima de edificación	7.5
Sistema de agrupamiento	Aislado
Adosamiento	No se permite
Antejardín mínimo	5 m
Densidad habitacional máxima bruta	8 hab/ha
Condiciones especiales	Se deberán considerar estudios de riesgo de conformidad a lo establecido al artículo 7 de la ordenanza

Fuente: Municipalidad de San Pedro de la Paz (2011).

La municipalidad de San Pedro de la Paz en conjunto con el Centro EULA, desarrollaron un atlas de riesgos naturales y antrópicos para la comuna, donde se analizó el riesgo de inundación a través de modelaciones hidráulicas considerando períodos de retorno de hasta 200 años. Los desbordes de cauces identificados en el análisis se concentraron en tres puntos principales: Ruta 156 (de la Madera), sector humedal Los Batros con su zona urbana adyacente y sector cercano a la desembocadura del río Biobío. Estas zonas coinciden con las áreas de riesgo definidas en el plan regulador.

Al comparar los planes reguladores comunales de Copiapó y San Pedro de la Paz, es posible observar que el primero incluye un estudio de riesgos donde se definen zonas de peligro a través de modelaciones hidráulicas para períodos de retorno de hasta 100 años, con lo cual se establecen recomendaciones según el nivel de peligro y se reconoce la necesidad de incorporar parques inundables en la zonificación. Por otro lado, en el caso de San Pedro de la Paz, el estudio de riesgos no se incorpora dentro del plan regulador; pero de igual manera se definen zonas potencialmente inundables, las que coinciden con las identificadas en el atlas de riesgo.

6.1.2. INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL VIGENTES A ESCALA COMUNAL

La comuna de Coronel, donde se inserta la zona de estudio, se encuentra regulada por dos instrumentos de planificación territorial vigentes. A nivel intercomunal por el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC) y a nivel comunal por el Plan Regulador Comunal de Coronel (PRC).

➤ Plan Regulador Metropolitano de Concepción

El PRMC es un instrumento normativo cuyo fin es orientar y regular el desarrollo físico de las áreas urbanas y rurales de las 11 comunas que conforman el Área Metropolitana de Concepción (AMC): Tomé, Penco, Talcahuano, Concepción, Chiguayante, Hualqui, Santa Juana, San Pedro de la Paz, Coronel y Lota. El actual PRMC entró en vigencia el año 2003 y ha tenido 10 modificaciones. Actualmente, se encuentra tramitando la 11° modificación, siendo la de mayor magnitud a la fecha. La modificación aborda temas relacionados con vialidad, las grandes industrias y su impacto intercomunal, las infraestructuras de impacto intercomunal, las áreas de crecimiento de los planes reguladores comunales (extensión urbana), las áreas verdes y parques metropolitanos y las áreas de protección ambiental y patrimonial, entre otros. Dentro de esto, una de las propuestas es la creación de áreas verdes y parques en los principales humedales de la comuna de Coronel, siendo uno de ellos el Parque Boca Maule.

En la figura N°12 es posible observar la zonificación del PRMC (2017) y la delimitación del humedal Boca Maule. (URBANCOST II). Se realizó un buffer de 300 metros alrededor del humedal para calcular las áreas de la zonificación presente en el instrumento de planificación.

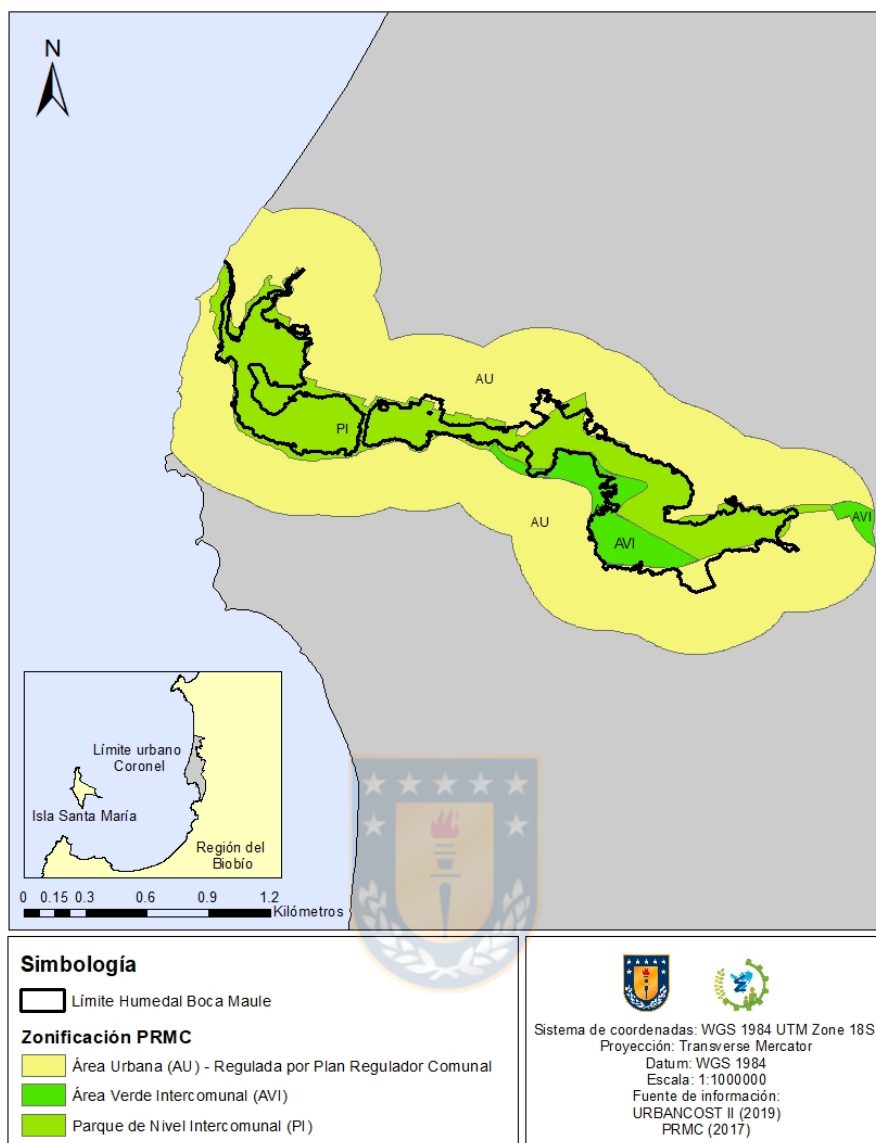


FIGURA N°12: Zonificación PRMC (2017) en la delimitación del humedal Boca Maule.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N°17 se observa en detalle la zonificación y usos permitidos establecidos por la ordenanza del PRMC dentro del humedal y en el área de influencia. La zonificación según el PRMC se divide en Área Urbana (AU), Área Verde Intercomunal (AVI) y Parque de Nivel Intercomunal (PI), al resumir el instrumento que aplica sobre el humedal en el área metropolitana, se obtuvo la figura N°13, donde se puede apreciar el porcentaje y usos permitidos, donde el mayor porcentaje lo ocupa el área de extensión urbana con un 74%, en segundo lugar, con un 21%

el área destinada a parque de nivel intercomunal y en último lugar con un 5%, el área verde intercomunal.

Tabla N°17: Zonificación y usos permitidos por el PRMC.

Sigla PRMC	Zonificación	Superficie (ha)	Usos permitidos
AU	Área urbana (Regulada por Planes Reguladores Comunales)	220.3	Según el Plan Regulador Comunal
AVI	Área verde intercomunal – Villa Mora	15.42	Equipamiento: científico, culto y cultura, deporte, esparcimiento.
PI	Parque de nivel intercomunal – Parque Boca Maule	63,71	Equipamiento: científico, culto y cultura, deporte, esparcimiento.

Fuente: Elaboración propia en base a ordenanza Plan Regulador Metropolitano de Concepción (2017).

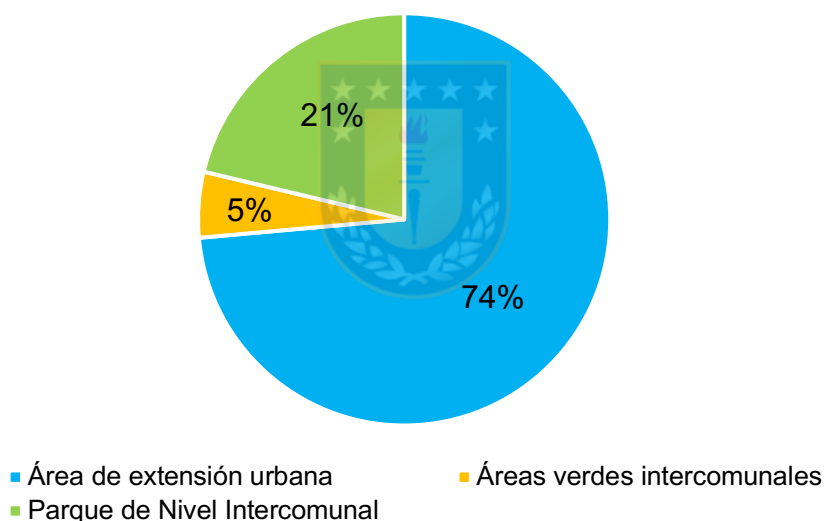


FIGURA N°13: Tipos de usos permitidos en el PRMC, para el humedal Boca Maule y área adyacente.

Fuente: Elaboración propia en base a zonificación del PRMC (2017).

En el título V Zonificación de áreas de protección y riesgo, el PRMC vigente distingue las siguientes categorías:

1. ZVN - Zona de valor natural: que responden a características físicas, de paisaje, vegetación y valor ambiental.

2. ZAM - Zona de Acantilados Marinos: corresponde a aquellas áreas que, por características geomorfológicas, ecológicas, de riesgos naturales, pendientes fuertes y de biodiversidad son identificadas como área de protección o riesgo.
3. ZP - Zona de playas: corresponde indistintamente a playas de mar y terrenos de playa que están considerados en la legislación vigente.
4. ZD - Zona de drenajes: corresponde a una subclasificación de áreas de riesgos que caben en la categoría de terrenos potencialmente inundables.

El objeto en áreas de protección corresponde a los elementos naturales protegidos por la legislación, en cambio en el caso de áreas de riesgo, el objeto corresponde a la protección de vidas con relación a las facultades de edificar en determinados sectores. Es claro que la legislación vigente se queda corta al momento de limitar los elementos protegidos, dejando fuera, por ejemplo: el bosque nativo, humedales o los cursos superficiales, quebradas o manantiales que estando presente en otros cuerpos legales no están sujetos a protección legal. En ese sentido, resulta importante destacar la Ley de Humedales Urbanos, que incorpora estos ecosistemas dentro de la planificación territorial.

Previo a la última modificación, el PRMC consideraba el área del humedal Boca Maule como zona de drenaje, donde los usos permitidos son: silvícola (sólo de protección) y minería. (sólo extracción de áridos de lechos en cursos de agua, autorizadas por los servicios competentes).

➤ **Plan Regulador Comunal de Coronel**

El Plan Regulador Comunal de Coronel es un IPT que regula el proceso de desarrollo físico y funcional de las áreas urbanas de la comuna de Coronel, de acuerdo con lo dispuesto por la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC), la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) y por el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC) y sus modificaciones.

Coronel cuenta con un PRC desde el año 1963, el cual se actualizó en 1983 y fue reformulado por completo en el año 2013 de acuerdo con las nuevas dinámicas de

desarrollo de la comuna, incorporando por primera vez el componente ambiental en el proceso de planificación urbana.

En la figura N°14 es posible observar la zonificación del PRC (2013) y la delimitación del humedal Boca Maule (URBANCOST II). Se realizó un buffer de 300 m alrededor del humedal para calcular las áreas de la zonificación presente en el instrumento de planificación.

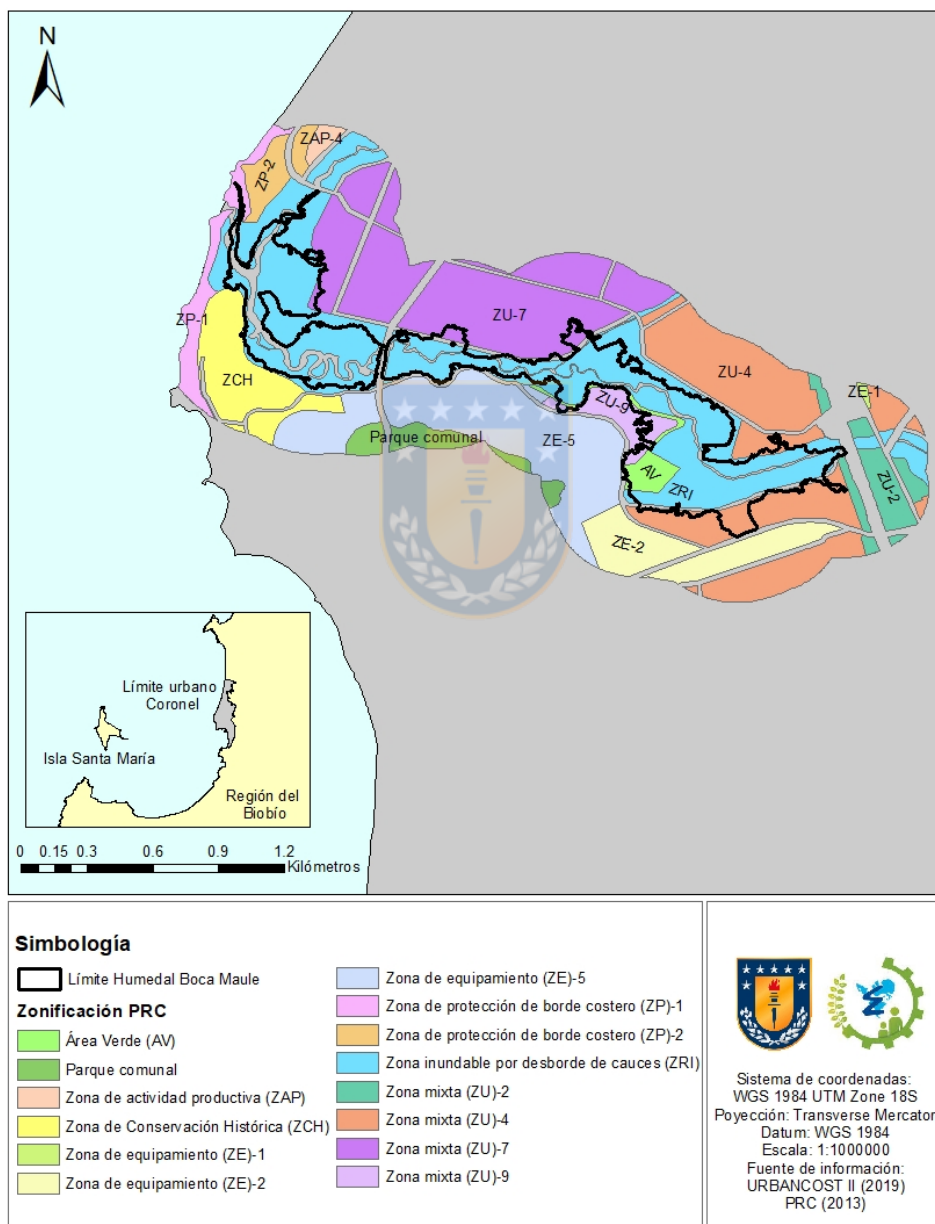


FIGURA N°14: Zonificación PRC (2013) en la delimitación del humedal Boca Maule.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N°18 se observa en detalle la zonificación y usos permitidos establecidos por la ordenanza del PRC, dentro del humedal y en zonas cercanas. Al resumir el análisis, se obtuvo la figura N°15, donde se puede apreciar el porcentaje y usos permitidos dentro del humedal según el PRC, donde el mayor porcentaje corresponde a Zona mixta (ZU) con un 40,26%, seguido por Zona inundable por desborde de cauces (ZRI) con un 26,64% y luego con un 18,82% la Zona de equipamiento (ZE).

Tabla N°18: Zonificación y usos permitidos por el PRC.

Sigla PRC	Zonificación	Superficie (ha)	Usos permitidos
AV	Área verde	3,8	Sin información
Parque comunal	Parque comunal	5,73	Se declara de utilidad pública los terrenos indicados como parque comunal.
ZAP-4	Zona de actividad productiva 4	1,3	Equipamiento: comercio, deporte, salud, seguridad. Actividades productivas. Infraestructura: transporte, sanitaria, energética.
ZCH	Zona de conservación histórica	14,69	Residencial. Equipamiento: comercio, culto y cultura, deporte, educación, salud, seguridad, social.
ZE-2	Zona de equipamiento 2	14	Equipamiento: deporte.
ZE-1	Zona de equipamiento 1	0,29	Equipamiento: científico, comercio, culto y cultura, deporte, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios.
ZE-5	Zona de equipamiento 5	35,49	Equipamiento: comercio, culto y cultura, deporte, educación, esparcimiento, seguridad.
ZP-1	Zona de protección de borde costero 1	7,31	Equipamiento: comercio, culto y cultura, deporte, servicios.
ZP-2	Zona de protección de borde costero 2	4,95	Equipamiento: comercio, deporte.
ZRI	Zona inundable por desborde de cauces	70,46	Equipamiento: deporte, esparcimiento.
ZU-2	Zona mixta 2	8,33	Residencial. Equipamiento: científico, comercio, culto y cultura, deporte, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios, social.
ZU-4	Zona mixta 4	44,16	Residencial. Equipamiento: comercio, culto y cultura, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios, social. Actividades

			productivas. Infraestructura: transporte.
ZU-7	Zona mixta 7	48,73	Residencial. Equipamiento: científico, comercio, culto y cultura, deporte, educación, esparcimiento, salud, seguridad, servicios, social. Actividades productivas. Infraestructura: transporte, sanitaria.
ZU-9	Zona mixta 9	5,26	Residencial. Equipamiento: comercio, culto y cultura, deporte, educación, salud, seguridad, servicios, social.

Fuente: Elaboración propia en base a ordenanza Plan Regulador Comunal de Coronel (2013).

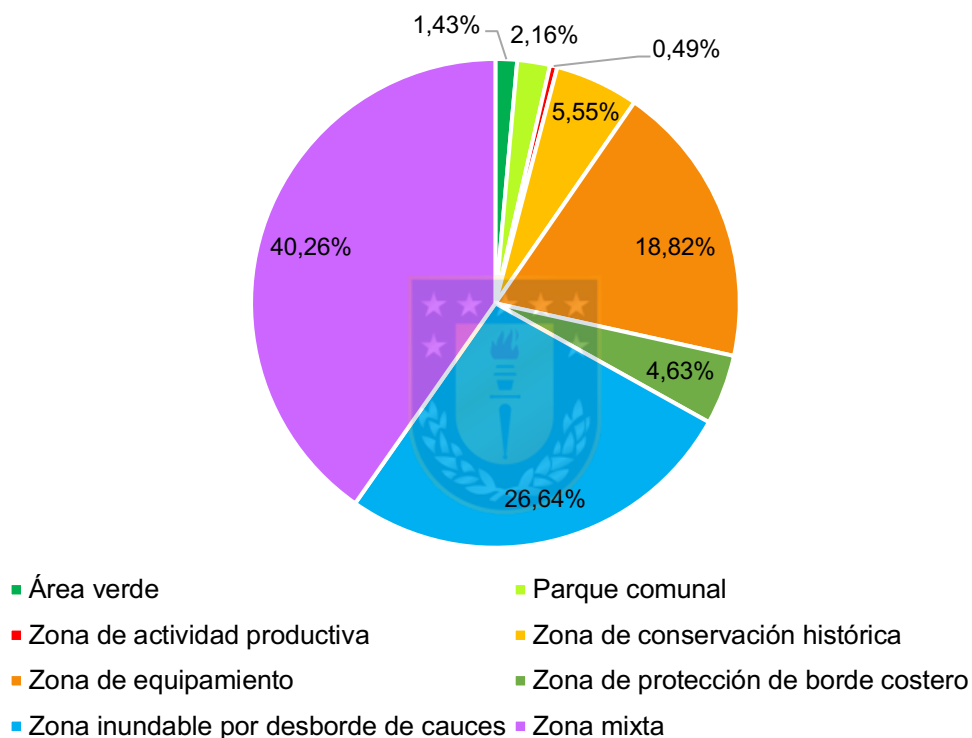


FIGURA N°15: Tipos de usos permitidos en el PRC, para el humedal Boca Maule y áreas adyacentes.

Fuente: Elaboración propia en base a zonificación del PRC.

Es posible observar que no existe un criterio homogéneo al zonificar el humedal y las áreas adyacentes. A nivel intercomunal el área de estudio es definida principalmente como Parque de Nivel Intercomunal, a nivel comunal es identificada como zona potencialmente inundable. Ambos instrumentos permiten usos variados en las zonas adyacentes al humedal y ninguno incorpora un análisis de riesgo de

inundación que permita identificar niveles de peligro, por lo tanto, se desconoce qué zonas podrían verse más o menos afectadas frente a un evento de inundación.

6.1.3. CRITERIOS INTERNACIONALES DE PLANIFICACIÓN URBANA

Con el fin de conocer los criterios urbanos internacionales utilizados para la planificación territorial de las zonas de inundación, se analizaron diferentes normativas y casos en Reino Unido, España y Estados Unidos. A continuación, se desglosa la información según el país, para finalmente realizar una comparación con Chile.

➤ Reino Unido

Se analizó el documento “*Technical Guidance to the National Planning Policy Framework*” (Orientación Técnica para el Marco de Políticas de Planificación Nacional) que busca orientar a las autoridades encargadas de la planificación para asegurar la implementación efectiva de la política establecida en la Política Marco de Planificación Nacional sobre el desarrollo en áreas con riesgo de inundación.

Dentro del documento se define el riesgo de inundación como el riesgo de todas las fuentes de inundación, incluidos los ríos y el mar, las aguas superficiales o aquellas que emerjan de las napas freáticas, alcantarillas y sistemas de drenaje, embalses, canales, lagos y otras fuentes artificiales. Las zonas de inundación se refieren a la probabilidad de inundación de ríos y mares ignorando la presencia de estructuras de defensa. A continuación, se describe cada una de ellas.

- **Zona 1 (baja probabilidad):** esta zona comprende áreas evaluadas con una probabilidad anual de inundaciones fluviales inferior a 1 en 1000 (<0,1%), es decir, inundaciones con un período de retorno de 1000 años. En esta zona se permite todo tipo de uso de suelo.
- **Zona 2 (probabilidad media):** áreas evaluadas con una probabilidad anual de inundación fluvial entre 1 en 100 y 1 en 1000 (0,1% - 1%), es decir, para períodos de retorno entre 100 y 1000 años. Los usos permitidos son: infraestructura esencial, infraestructura compatible con el agua, menos vulnerable y más

vulnerable, los usos altamente vulnerables son apropiados en esta zona sólo si pasan una prueba de excepción.

- **Zona 3a (alta probabilidad):** áreas evaluadas con una probabilidad anual de inundaciones fluviales de 1 en 100 o más (>1%), es decir, mayor o igual a un período de retorno de 100 años. Los usos permitidos son: infraestructura compatible con el agua y aquellos menos vulnerables.
- **Zona 3b (llanura aluvial):** áreas donde el agua tiene que fluir o almacenarse durante una inundación. Las autoridades de planificación local deben identificar las llanuras de inundación funcional y sus límites, esta identificación no se basa en estándares rígidos en cuanto a la probabilidad de inundación, sino que se acomoda a las circunstancias específicas de la localidad. Se considera una probabilidad anual de 5% o más (período de retorno mayor o igual a 20 años), o que está diseñada para una inundación extrema (0,1%). Los usos permitidos son aquellos compatibles con el agua y la infraestructura esencial. Estos deben ser diseñados y construidos para permanecer operativos y seguros durante eventos de inundación, además no deben aumentar el riesgo de inundación en otro lugar.

En la tabla N°19 es posible observar las zonas de riesgo y los usos permitidos según la vulnerabilidad al riesgo de inundación. La infraestructura asociada a esa vulnerabilidad se muestra en el ANEXO N°1.

Tabla N°19: Vulnerabilidad al riesgo de inundación y estructuras compatibles con las zonas de riesgo.

Zonas de riesgo	Clasificación según vulnerabilidad al riesgo de inundación				
	Infraestructura esencial	Infraestructura compatible con el agua	Alta vulnerabilidad	Más vulnerable	Menos vulnerable
Zona 1	x	x	x	x	x
Zona 2	x	x	Requiere test de excepción	x	x
Zona 3a	Requiere test de excepción	x	-	Requiere test de excepción	x
Zona 3b	Requiere test de excepción	x	-	-	-

Fuente: Adaptado de “Technical Guidance to the National Planning Policy Framework”.

➤ España

Europa sufrió más de cien inundaciones graves entre los años 1998 y 2004, que causaron el desplazamiento de aproximadamente medio millón de personas y al menos 25.000 millones de euros de pérdidas económicas en seguros (Yagüe, 2008). Esto motivó a la Comisión Europea a la creación de la Directiva 2007/60/CE sobre la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. La Directiva prescribe que los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación deberán contener medidas de ordenación territorial y urbanismo, que incluyan al menos las limitaciones al uso de suelo en zonas inundables en sus diferentes escenarios de peligrosidad.

En España se han formulado diversas propuestas para la regulación de los usos de las zonas inundables, a continuación, se analiza el Plan de Ordenación Territorial (POT) del Gobierno de Navarra, que incluye criterios relativos a la zonificación de áreas inundables y usos de suelo admisible.

El POT del Gobierno de Navarra configura el espacio fluvial por las siguientes zonas:

- **Zona fluvial:** dentro de ella el sistema de cauces y riberas. Preservación a la protección de la calidad del agua y de los ecosistemas asociados, así como de la morfología del cauce (terreno cubierto por las aguas en las máximas crecidas ordinarias) y sus riberas.
- **Zona de territorio fluvial preferente:** zona del espacio fluvial necesaria para proteger el régimen de corrientes en avenidas y reducir el riesgo de producción de daños en personas y bienes.
- **Zonas inundables:** Se considera zona inundable, de conformidad con la legislación vigente y atendiendo a estudios geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, la delimitada por los niveles teóricos que alcanzarían las aguas en las avenidas cuyo periodo de retorno sea de 500 años. Para regulación de esta área se consideran tres niveles de riesgo (según los períodos de retorno y los calados):
 - **Zona de riesgo bajo:** cabe esperar inundaciones con un $T > 50$ años y $H < 0,4$ m.

- **Zona de riesgo medio:** cabe esperar inundaciones con un $T < 50$ años y $H < 0,4\text{m}$; o con un $T > 100$ años y $0,4\text{m} < H < 1\text{m}$.
- **Zona de riesgo alto:** cabe esperar inundaciones con un $T < 100$ años y $0,4\text{m} < H < 1\text{m}$ o un $H > 1\text{m}$; o con un $100\text{años} < T < 500\text{años}$ y un $H > 1\text{m}$. En cualquier caso, sea cual sea el calado esperado, se considerará también zona de riesgo alto cuando la velocidad del agua sea igual o superior a 1m/s .

En la tabla N°20 es posible observar en resumen las zonas de riesgo según calados y períodos de retorno. En la tabla N°21, es posible observar los usos de suelo para las zonas de riesgo antes descritas.

Tabla N°20: Zonas de riesgo según calados y períodos de retorno.

Calado (metros)	Períodos de retorno (años)		
	≤ 50	$> 50 \text{ a } \leq 100$	$> 100 \text{ a } \leq 500$
> 1	Alto	Alto	Alto
$> 0,4 \text{ a } \leq 1$	Alto	Alto	Medio
$0 \text{ a } \leq 0,4$	Medio	Bajo	Bajo

Fuente: Gobierno de Navarra, Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente.

En zonas sujetas a cualquier nivel de riesgo:

- Las edificaciones de una planta deberán contar con una azotea accesible desde el interior mediante escalera.
- La disposición de las edificaciones no se orientará de forma transversal al sentido del flujo de la inundación.
- Se prohíben usos residenciales, industriales y comerciales a cota inferior a la rasante de la calle.

Tabla N°21: Usos de suelo según zonas de riesgo.

Zonas de riesgo	Uso compatible	Uso prohibido
Bajo	Residencial: si se sitúa -incluidos los sótanos si los hubiere- a una cota tal que no quede afectado por la avenida de 100 años.	Industrias peligrosas y/o insalubres.
	Industria: ligera-servicios y pesada. En caso de la industria pesada con la adopción de las medidas de defensa que se	Equipamientos comunitarios vitales: servicios públicos

	estimen oportunas, siempre que el tiempo de respuesta sea mayor que 3 horas.	esenciales como bomberos, hospitales, y similares.
	Equipamientos comunitarios abiertos y cerrados (salvo vitales): parques, zonas deportivas al aire libre compatibles con una inundación, aparcamientos en superficie, y otros similares. Equipamientos cerrados	
	Infraestructuras lineales y puntuales.	
Medio	Residencial, si se sitúa -incluidos los sótanos si los hubiere- a una cota tal que no quede afectada por la avenida de 100 años, y siempre que el tiempo de respuesta sea mayor que 3 horas y esté operativo el SAIH (Sistemas Automáticos de Información Hidrológica).	Industrias peligrosas, pesadas e insalubres.
	Industria: ligera-servicios, siempre que el tiempo de respuesta sea mayor que 3 horas y esté operativo el SAIH.	Equipamientos comunitarios cerrados y vitales.
	Equipamientos comunitarios abiertos, como parques, zonas deportivas al aire libre compatibles con una inundación, aparcamientos en superficies, y otros similares.	
	Infraestructuras lineales, siempre que permitan la preservación del régimen de corrientes.	
	Infraestructuras puntuales: depuradoras, con medidas de drenaje, defensa y protección.	
Alto	Equipamientos comunitarios abiertos como parques, zonas deportivas al aire libre compatibles con una inundación, aparcamientos en superficies, y otros similares, siempre que el tiempo de respuesta sea mayor de 2 horas.	Residencial
	Infraestructuras lineales, siempre que permitan la preservación del régimen de corrientes.	Industrial
	Infraestructuras puntuales: depuradoras, con medidas de drenaje, defensa y protección.	Equipamientos comunitarios cerrados y vitales.

Fuente: Elaboración propia en base Plan de Ordenación Territorial (2011), Gobierno de Navarra.

➤ Estados Unidos

En Estados Unidos opera la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por su sigla en inglés), que tiene como objetivo proteger a la nación contra todo tipo de riesgos y desastres, tales como inundaciones, terremotos, tornados, huracanes y emergencias nacionales.

FEMA ha creado Mapas de Tasas del Seguro de Inundación (FIRM's, por su sigla en inglés), que tienen como propósito ilustrar las zonas de inundación, en la figura 16 es posible observar un mapa de ejemplo. Estas zonas son áreas geográficas que

FEMA define según los niveles del riesgo y tipo de inundación. A continuación, se describe cada zona.



FIGURA N°16: Mapa de ejemplo zona costera.

Fuente: sitio web de FEMA (fema.gov).

1. Cauce mayor (*floodway*): terrenos regulados y adyacentes al cuerpo de agua que se reservan para descargar la inundación base (inundación con probabilidad de un 1% anual de ocurrencia) sin aumentar acumulativamente la elevación superficial de las aguas del valle inundable.
2. Zona A: establecida por métodos aproximados y para la cual no se ha determinado la elevación de la inundación base.
3. Zona AE: determinada por métodos específicos y para la cual se indican las elevaciones de la inundación base.
4. Zona AO: define la profundidad de la inundación base, fluctúa entre 0,3 m y 0,91 m.
5. Zona VE: área costera de alto peligro de inundación y para la cual se indican las elevaciones de la inundación base.
6. Zona A99: área que será protegida luego de completarse un proyecto de protección de inundaciones.

7. Zona X/0,2% (oscurecida): área de inundación con 0,2% de probabilidad de ocurrir cada año. (inundación de 500 años).
8. Zona X (no oscurecida): área determinada fuera del área especial de riesgo de inundación y de la zona 0,2%.

En las tablas N°22 y N°23 se describen con mayor detalle las zonas de riesgo consideradas por FEMA.

Tabla N°22: Áreas de riesgo moderado de inundación.

En las comunidades que participan en el Programa Nacional de Seguro contra Inundaciones (NFIP, por sus siglas en inglés), el seguro contra inundaciones está disponible para todos los propietarios y arrendatarios en estas zonas:

Zona	Descripción
B y X (sombreado)	Área de riesgo moderado de inundación, son usualmente las áreas entre los límites de inundaciones con períodos de retorno de 100 y 500 años. Las zonas B son usadas como base para designar la llanura de inundación de menor riesgo, tanto como áreas protegidas con niveles de inundación con período de retorno de 100 años, o áreas de inundación superficial con promedios de profundidad menor a 1 pie (0,3 m).
C y X	Áreas de riesgo mínimo de inundación, que son usualmente representadas en FIRMs sobre el nivel de inundaciones con período de retorno de 500 años. La zona C puede tener problemas de estancamiento y drenaje local que no justifica un estudio detallado. La zona X es el área que está fuera de las inundaciones con período de retorno de 500 años y protegida por un dique en inundaciones con períodos de retorno desde los 100 años.

Fuente: Definitios of FEMA Flood Zone Designations.

Tabla N°23: Áreas de alto riesgo de inundación.

En las comunidades que participan en el NFIP, los requisitos obligatorios de compra de seguro contra inundaciones se aplican a todas estas zonas:

Zona	Descripción
A	Áreas con una probabilidad anual de inundación de un 1%. Al no realizar análisis detallados de estas áreas, no se muestra la profundidad o elevación base de inundación dentro de estas zonas.
AE	La llanura de inundación base donde se proporcionan las elevaciones de inundación base. Las Zonas AE ahora son usadas en el formato FIRMs en lugar de las zonas A1-A30.

A1-A30	Son conocidas como zonas A numeradas. Son la llanura de inundación base donde FIRM muestra una elevación base de inundación, formato antiguo.
AH	Áreas con un 1% de probabilidad de inundación superficial, normalmente con forma de estanque, con una profundidad promedio que varía entre 1 a 3 pies (0,3 m a 0,91 m). Las elevaciones de inundación base derivadas de análisis detallados muestran intervalos seleccionados dentro de estas zonas.
AO	Áreas de peligro de inundación de ríos o arroyos y áreas con una probabilidad de inundación superficial mayor o igual a 1% cada año, generalmente en forma de flujo laminar, con un promedio de profundidad entre 1 y 3 pies (0,3 m a 0,91 m). La profundidad promedio de inundación derivada de análisis detallados se muestra dentro de estas zonas.
AR	Áreas con un aumento temporal del riesgo de inundación durante la construcción o restauración de un sistema de control de inundaciones (como un dique o una presa). En la compra del seguro obligatorio contra inundaciones se aplicarán requisitos; pero las tarifas no pueden exceder las establecidas para las zonas A no numeradas, si las estructuras son construidas o restauradas en cumplimiento de la regulación establecida para las llanuras de inundación de las zonas AR.
A99	Áreas con una probabilidad anual de inundación de un 1% que serán protegidas por el sistema federal del control de inundaciones, donde las construcciones cumplen requisitos legales específicos. No se muestra la profundidad o elevación base de inundación dentro de estas zonas.

Fuente: Definitios of FEMA Flood Zone Designations.

6.1.4. COMPARACIÓN CON CASOS INTERNACIONALES

Luego de realizar un análisis de la planificación territorial de las zonas inundables en Reino Unido, España y Estados Unidos, fue posible realizar tablas resumen con información de cada país (tablas N°24-N°26), donde es posible observar los usos permitidos y criterios incorporados según los niveles de riesgo.

Tabla N°24: Resumen de criterios incorporados en Reino Unido.

Nivel de riesgo	T(años)	Probabilidad anual de inundación	Usos de suelo permitidos	Criterios incorporados
1 – Baja probabilidad	<10	<0,1%	Todo tipo de usos.	No se incorporan criterios como velocidad o profundidad.
2 – Probabilidad media	10-100	0,1%-1%	Infraestructura esencial y compatible con el agua.	

3a – Alta probabilidad	>100	>1%	Compatible con el agua y menos vulnerable.
3b – Llanura aluvial funcional	≥20	≥5%	Compatible con el agua.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°25: Resumen de criterios incorporados en España.

Nivel de riesgo	T(años) y H(m)	Probabilidad anual de inundación	Usos de suelo permitidos	Criterios incorporados
Bajo	T>50 y H<0,4	>2%	Residencial, industria ligera, equipamiento abiertos y cerrados.	Se considera la profundidad y en algunos casos la velocidad de la inundación.
Medio	T<50 y H<0,4; T>100 y 0,4<H<1	1%-2%	Residencial, industria ligera, equipamiento abierto.	
Alto	T<100 y 0,4<H<1 ó H>1; 100<T<500 y H>1	T<1% ó 0,2%-1%	Equipamiento comunitario abierto.	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°26: Resumen de criterios incorporados en Estados Unidos.

Nivel de riesgo	T(años)	Probabilidad anual de inundación	Usos de suelo permitidos	Criterios incorporados
Alto	100	1%	No se define con detalle los usos permitidos. La definición del riesgo se establece para zonas residenciales.	Se considera la profundidad y la velocidad en algunos casos.
Moderado	100-500	1%-5%		

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los criterios internacionales de planificación urbana y compararlos con la normativa urbana chilena presente en los Instrumentos de Planificación Territorial, quedó en evidencia que no existe una homogeneidad en los criterios utilizados para definir zonas con peligro de inundación en Chile, provocando que existan usos de

suelo no adecuados en estas áreas. Lamentablemente, no todas las comunas consideran criterios hidrológicos al momento de establecer la zonificación dentro del Plan Regulador Comunal, lo que dificulta la posibilidad de establecer áreas de riesgo de inundación. A nivel nacional existen algunas excepciones como la comuna de Copiapó, que incorpora en la última modificación del Plan Regulador Comunal una modelación de inundaciones para períodos de retorno de hasta 100 años, para obtener niveles de profundidad, con lo que fue posible establecer niveles de peligro. El uso de la modelación permitió generar recomendaciones, como medidas no estructurales, para los distintos niveles de peligrosidad.

En general los criterios internacionales apuntan a inundaciones para períodos de retorno de 100 años o con una probabilidad anual de 1% como zonas de alto riesgo. Bajo ese criterio los usos permitidos en estas áreas se destinan a espacios abiertos comunitarios.

Al analizar la normativa urbana de planificación que opera sobre el humedal Boca Maule, considerando un área de influencia de 300 metros alrededor del humedal, la zonificación según los Planes Reguladores muestra que el área de estudio es considerada como una zona principalmente de extensión urbana, con usos de suelo diversos, destinados a equipamiento de distintas categorías, como zonas residenciales, comercio y áreas verdes. El área definida como humedal se encuentra zonificada como Parque de Nivel Intercomunal según el Plan Regulador Metropolitano de Concepción y como Zona inundable por desborde de cauces según el Plan Regulador Comunal de Coronel.

6.2. CÁLCULO DE CAUDALES DE CRECIDAS MÁXIMAS PARA PERÍODOS DE RETORNO DE HASTA 100 AÑOS

- **Determinación de la precipitación diaria máxima de período de retorno de 10 años.**

Se analizaron las estaciones meteorológicas con influencia dentro de la cuenca (Tabla N°27), se aplicó el criterio de optar por aquellas con al menos 30 años de

registro de precipitación para validar la aplicación de métodos hidrológicos, donde se decidió realizar el análisis a través de la estación Carriel Sur, de la Dirección Meteorológica de Chile.

Tabla N°27: Estaciones meteorológicas con influencia dentro de la cuenca.

Nombre estación	Carriel Sur	Concepción DGA	Río Biobío en Desembocadura
Código	360019	08410001-3	08394001-8
UTM Este	-	669387	6272852
UTM Norte	-	5921946	5921362
Altitud	12	28	16
Latitud	36°46'21"	36°49'60"	36°50'16"
Longitud	73°03'47"	73°06'02"	73°03'41"
Vigencia	Vigente	Vigente	Vigente
Fecha inicio	01-01-1968	01-01-1996	01-04-2001
Código cuenca	082	084	083
Código subcuenca	0823	0841	0839
Código subsubcuenca	08230	08410	08394
Región	Biobío	Biobío	Biobío
Provincia	Concepción	Concepción	Concepción
Comuna	Concepción	Concepción	Concepción

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis de frecuencia de los datos de la estación Carriel Sur (ver ANEXO N°2-N°3), para la obtención de la precipitación máxima en 24hrs (P_{24}^{10}). Para ello se utilizaron 7 distribuciones de probabilidad expuestas en la tabla N°28 para la estación, junto con la precipitación máxima con un período de retorno de 10 años. El resultado se analizó mediante los indicadores de calidad de ajuste, primeramente, observando la aprobación de cada test (χ^2 , Kolmogorov Smirnov y Anderson Darling) y posterior a ello, graficando los valores (ANEXO N°4). Bajo este contexto, se escogió la distribución de frecuencia que mejor se ajustaba, que es la distribución Gen. extreme value.

Tabla N°28: Distribuciones de frecuencia para (P_{24}^{10}) para la estación Carriel Sur.

Distribuciones de frecuencias T (10 años)	Estación Carriel Sur P_{24}^{10} [mm]
Gen. extreme value	114.07
Pearson 5 (3P)	114.9

Pearson 5	112.96
Lognormal (3P)	115.91
Lognormal	111.82
Gumbel max	114.68
Normal	113.94

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se comparó el valor de precipitación con los obtenidos por el MOP-DGA, en el estudio “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días” para validar el resultado, lo que concuerda, ya que se encuentra dentro del rango de precipitación para la zona, que está entre 100 y 120mm.

6.2.1. Método DGA-AC

La zona homogénea a la que pertenece la cuenca es la denominada Up (Cuencas Costeras VIII región) con un valor de α de 1,2-1,5, como el manual no especifica el uso de este valor, se decidió utilizar el promedio entre ambos, es decir, α de 1,35.

Para el cálculo de la curva de frecuencia regional de caudales medios diarios máximos se utilizaron los valores máximos de $Q(T)/Q(10)$, siendo Q caudal y T período de retorno. Aplicando la ec.1 se obtuvo el valor de Q_{10} , lo cual permitió obtener los resultados para la curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo.

La tabla N°29 muestra los valores obtenidos para la curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método DGA-AC, donde el valor de Q_{10} es igual a 20,42 m³/s.

Tabla N°29: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método DGA-AC.

Período de retorno T (años)	Q(T)/Q(10)		
	Curva de frecuencia regional adimensional	Curva de frecuencias caudal medio diario máximo $QT=Q(T)/Q(10)*Q_{10}$	Curva de frecuencia caudal instantáneo máximo $\alpha*QT$
2	0,63	15,13	20,43
5	0,85	20,42	27,56
10	1	24,02	32,43
20	1,19	28,58	38,59
25	1,25	30,02	40,53

50	1,44	34,56	46,69
75	1,47	35,31	47,6
100	1,54	36,99	49,94

Fuente: Elaboración propia.

La tabla N°30 muestra los valores obtenidos para la curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método DGA-AC, donde el valor de Q_{10} es igual a 18,6 m³/s.

Tabla N°30: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método DGA-AC.

Período de retorno T (años)	Q(T)/Q(10)		
	Curva de frecuencia regional adimensional	Curva de frecuencias caudal medio diario máximo $QT=Q(T)/Q(10)*Q10$	Curva de frecuencia caudal instantáneo máximo $\alpha*QT$
2	0,63	11,72	15,82
5	0,85	15,81	21,34
10	1	18,6	25,11
20	1,19	22,13	29,88
25	1,25	23,25	31,39
50	1,44	26,78	36,16
75	1,47	27,34	36,91
100	1,54	28,64	38,67

Fuente: Elaboración propia.

La tabla N°31 muestra los valores obtenidos para la curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método DGA-AC, donde el valor de Q_{10} es igual a 21,4 m³/s.

Tabla N°31: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método DGA-AC.

Período de retorno T (años)	Q(T)/Q(10)		
	Curva de frecuencia regional adimensional	Curva de frecuencias caudal medio diario máximo $QT=Q(T)/Q(10)*Q10$	Curva de frecuencia caudal instantáneo máximo $\alpha*QT$
2	0,63	13,482	18,2
5	0,85	18,19	24,56
10	1	21,4	28,89
20	1,19	25,47	34,38
25	1,25	26,75	36,11

50	1,44	30,82	41,6
75	1,47	31,46	42,47
100	1,54	32,96	44,49

Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Método Verni y King modificado

Para aplicar el método se utilizó el coeficiente empírico $C(T=10)$ para la VIII región del Biobío (Tabla N°7), que corresponde a 0,79 y el coeficiente de fórmula empírica $C(T)/C(T=10)$ de la tabla N°8 para los distintos períodos de retorno. Con estos valores es posible aplicar la ec.2.

Las tablas N°32, N°33 y N°34 muestran los valores obtenidos para la curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo para el Estero Maule, Estero La Posada y Estero Lagunillas respectivamente, según el método Verni y King modificado.

Tabla N°32: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método Verni y King modificado.

T (años) [1]	C(T=10 años) [2]	C(T)/C(T=10) [3]	C(T) [4]	P_{24}^{10} (mm) [5]	CFT (mm) [6]	P_{24}^T (m ³ /s) [7]	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo [8]
2	0,79	1,04	0,822	114,07	1	114,07	46,66
5	0,79	1,04	0,822	114,07	0,692	78,96	29,56
10	0,79	0,91	0,719	114,07	0,88	100,38	34,84
20	0,79	0,99	0,782	114,07	1	114,07	44,41
25	0,79	1	0,79	114,07	1,111	126,73	51,12
50	0,79	1,01	0,798	114,07	1,248	142,3	59,64
100	0,79	1,02	0,806	114,07	1,354	154,45	66,63

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Columna 1: Período de retorno
- Columna 2: Valor del coeficiente empírico de período de retorno 10 años, obtenido de la tabla N°7.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno de 10 años, obtenido de la tabla N°8.

- Columna 4: curva de frecuencias de coeficiente empírico (Columna 2*Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima en 24hrs. obtenida para la estación Carriel Sur mediante análisis de distribuciones (tabla N°28).
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido de estudio “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días”.
- Columna 7: Precipitación diaria máxima de período de retorno T (Columna 5*Columna 6).
- Columna 8: Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo, calculado para cada período de retorno según la ecuación 2.

Tabla N°33: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método Verni y King modificado.

T (años)	C(T=10 años)	C(T)/C(T=10)	C(T)	P_{24}^{10} (mm)	CFT (mm)	P_{24}^T (m ³ /s)	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo
2	0,79	1,04	0,822	114,07	1	114,07	36,96
5	0,79	1,04	0,822	114,07	0,692	78,96	23,41
10	0,79	0,91	0,719	114,07	0,88	100,38	27,6
20	0,79	0,99	0,782	114,07	1	114,07	35,18
25	0,79	1	0,79	114,07	1,111	126,73	40,49
50	0,79	1,01	0,798	114,07	1,248	142,3	47,24
100	0,79	1,02	0,806	114,07	1,354	154,45	52,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°34: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método Verni y King modificado.

T (años)	C(T=10 años)	C(T)/C(T=10)	C(T)	P_{24}^{10} (mm)	CFT (mm)	P_{24}^T (m ³ /s)	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo
2	0,79	1,04	0,822	114,07	1	114,07	42,02
5	0,79	1,04	0,822	114,07	0,692	78,96	26,62
10	0,79	0,91	0,719	114,07	0,88	100,38	31,38
20	0,79	0,99	0,782	114,07	1	114,07	39,99
25	0,79	1	0,79	114,07	1,111	126,73	46,03
50	0,79	1,01	0,798	114,07	1,248	142,3	53,71
100	0,79	1,02	0,806	114,07	1,354	154,45	60

Fuente: Elaboración propia.

6.2.3. Fórmula racional

Al igual que en el método anterior, se utilizó el coeficiente de esorrentía para la región del Biobío (tabla N°9). Siguiendo la metodología propuesta para este método (Figura N°9), fue posible obtener los resultados expuestos en las tablas N°35, N°36 y N°37 para el Estero Maule, Estero La Posada y Estero Lagunillas, respectivamente.

Tabla N°35: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Maule por el método Fórmula Racional.

T (años) [1]	C(T=10 años) [2]	C(T)/C(T=10) [3]	C(T) [4]	P_{24}^{10} (mm) [5]	CFT (mm) [6]	P_{24}^T (m3/s) [7]	tc (hrs) [8]	CDtc=2,4 [9]	I_{tc}^T (mm/hr) [10]	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo [11]
2	0,36	1,04	0,374	114,07	1	114,07	2,39	0,322	15,37	64,37
5	0,36	1,04	0,374	114,07	0,692	78,94	2,39	0,322	10,64	44,56
10	0,36	0,91	0,327	114,07	1	114,07	2,39	0,322	13,52	53,92
20	0,36	0,99	0,356	114,07	0,88	100,38	2,39	0,322	15,37	56,32
25	0,36	1	0,36	114,07	1,111	126,73	2,39	0,322	17,07	68,76
50	0,36	1,01	0,363	114,07	1,248	142,36	2,39	0,322	19,18	78
100	0,36	1,02	0,367	114,07	1,354	154,45	2,39	0,322	20,81	85,47

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Columna 1: Período de retorno.
- Columna 2: Valor del coeficiente de esorrentía de período de retorno 10 años, obtenido de la tabla N°9.
- Columna 3: Curva de frecuencias de coeficiente empírico referido al valor de período de retorno de 10 años, obtenido de la tabla N°8.
- Columna 4: Coeficiente empírico de período de retorno T años (Columna 2 * Columna 3).
- Columna 5: Precipitación diaria máxima en 24hrs. obtenida para la estación Carriel Sur mediante análisis de distribuciones (tabla N°28).
- Columna 6: Coeficiente de frecuencia de la cuenca, obtenido de estudio “Precipitaciones máximas en 1,2 y 3 días”.

- Columna 7: Curva de frecuencias de precipitación diaria máxima. (Columna 6 * Columna 5).
- Columna 8: Tiempo de concentración de la cuenca, obtenido según la ecuación N°4 y el software ArcGis 10.4.1.

$$t_c = 0,95 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

- t_c : Tiempo de concentración de la cuenca, expresado en horas.
- L: Longitud del cauce principal, expresado en kilómetros.
- H: Desnivel máximo de la cuenca, expresando en metros.
- Columna 9: Coeficiente de duración para el tiempo de concentración de la cuenca.
- Columna 10: Intensidad media de precipitación para una duración igual al tiempo de concentración y un periodo de retorno T (Columna 7 * Columna 9/Columna 8).
- Columna 11: Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo, obtenido con la ec.3.

Tabla N°36: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero La Posada por el método Fórmula Racional.

T (años)	C(T=10 años)	C(T)/C(T=10)	C(T)	P_{24}^{10} (mm)	CFT (mm)	P_{24}^T (m3/s)	t_c (hrs)	CD $t_c=2,4$	$I_{t_c}^T$ (mm/hr)	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo
2	0,36	1,04	0,374	114,07	1	114,07	2,39	0,322	15,37	49,39
5	0,36	1,04	0,374	114,07	0,692	78,94	2,39	0,322	10,64	34,19
10	0,36	0,91	0,327	114,07	1	114,07	2,39	0,322	13,52	41,37
20	0,36	0,99	0,356	114,07	0,88	100,38	2,39	0,322	15,37	43,24
25	0,36	1	0,36	114,07	1,111	126,73	2,39	0,322	17,07	52,76
50	0,36	1,01	0,363	114,07	1,248	142,36	2,39	0,322	19,18	59,86
100	0,36	1,02	0,367	114,07	1,354	154,45	2,39	0,322	20,81	65,58

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°37: Curva de frecuencia de caudales instantáneos máximos del Estero Lagunillas por el método Fórmula Racional.

T (años)	C(T=10 años)	C(T)/C(T=10)	C(T)	P_{24}^{10} (mm)	CFT (mm)	P_{24}^T (m3/s)	tc (hrs)	CDtc=2,4	I_{tc}^T (mm/hr)	Curva de frecuencia de caudal instantáneo máximo
2	0,36	1,04	0,374	114,07	1	114,07	2,39	0,322	15,37	57,15
5	0,36	1,04	0,374	114,07	0,692	78,94	2,39	0,322	10,64	39,56
10	0,36	0,91	0,327	114,07	1	114,07	2,39	0,322	13,52	47,87
20	0,36	0,99	0,356	114,07	0,88	100,38	2,39	0,322	15,37	50
25	0,36	1	0,36	114,07	1,111	126,73	2,39	0,322	17,07	61,04
50	0,36	1,01	0,363	114,07	1,248	142,36	2,39	0,322	19,18	69,25
100	0,36	1,02	0,367	114,07	1,354	154,45	2,39	0,322	20,81	75,88

Fuente: Elaboración propia.

6.2.4. Comparación entre los métodos propuestos y la frecuencia de caudales máximos de las estaciones fluviométricas

Para el caso del análisis de frecuencia de los flujos obtenidos de las estaciones Estero Bellavista en Tomé y Estero Nonguén frente U. del Biobío (ANEXOS N°5), el ajuste de distribución que mejor describe su comportamiento de los 7 utilizados, fue Pearson 5 (3P), expresando los resultados en las tablas N°38-N°40, incluyendo además los métodos indirectos DGA-AC, Verni y King y Fórmula Racional para cada estero, para facilitar su comparación.

Tabla N°38: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero Maule.

T (años)	Método DGA-AC	Método Verni y King	Método Fórmula Racional	Frecuencia Caudales máximos Estero Bellavista	Frecuencia Caudales máximos Estero Nonguén
2	20,43	46,66	64,37	11,01	7,77
5	27,56	29,56	44,56	14,18	11
10	32,43	34,84	53,92	17,5	14,87
20	38,59	44,41	56,32	22,03	20,71
25	40,53	51,12	68,76	23,82	23,17
50	46,69	59,64	78	30,75	33,33

100	49,94	66,63	85,47	40,31	48,79
-----	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°39: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero La Posada.

T (años)	Método DGA-AC	Método Verni y King	Método Fórmula Racional	Frecuencia Caudales máximos Estero Bellavista	Frecuencia Caudales máximos Estero Nonguén
2	15.82	36.96	49.39	9.87	5.96
5	21.34	23.41	34.19	12.70	8.44
10	25.11	27.6	41.37	15.67	11.40
20	29.88	35.18	43.24	19.73	15.88
25	31.39	40.49	52.76	21.34	17.77
50	36.16	47.24	59.86	27.54	25.56
100	38.7	52.78	65.58	36.11	37.43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°40: Comparación de caudales máximos instantáneos obtenidos por métodos indirectos y la frecuencia de caudales máximos obtenidos de forma directa para el Estero Lagunillas.

T (años)	Método DGA-AC	Método Verni y King	Método Fórmula Racional	Frecuencia Caudales máximos Estero Bellavista	Frecuencia Caudales máximos Estero Nonguén
2	18.2	42.02	57.15	9.18	6.59
5	24.6	26.62	39.56	11.81	9.35
10	28.89	31.38	47.87	14.58	12.63
20	34.38	39.99	50	18.36	17.59
25	36.11	46.03	61.04	19.85	19.68
50	41.6	53.71	69.25	25.62	28.3
100	44.49	60	75.88	33.59	41.44

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados obtenidos de las tablas anteriores, es posible observar que el comportamiento de caudales máximos para los esteros de estudio es más similar a los valores obtenidos por el método DGA-AC, donde para períodos de retorno mayores se presentan diferencias menores entre los valores obtenidos por métodos indirectos y los calculados de forma directa, a través de los datos de las

estaciones fluviométricas de los esteros Bellavista y Nonguén. Los métodos Verni y King Modificado y Fórmula Racional se escapan del rango de la curva de frecuencia de los caudales máximos de las estaciones fluviométricas. Por tanto, los valores utilizados para la modelación corresponden a los obtenidos por el método DGA-AC.

6.3. CONTRASTE DE ZONAS DE INUNDACIÓN MODELADAS CON LA ZONIFICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

6.3.1. Modelación de inundaciones

La modelación hidráulica permitió definir el área de extensión de inundación asociada al humedal Boca Maule para períodos de retorno de 2, 10, 50 y 100 años (Figura N° 16). En general, no se observan mayores diferencias para inundaciones más frecuentes y de menor magnitud, correspondientes a las figuras 16 A) y 16 B), que representan las inundaciones para períodos de retorno 2 y 10 años, respectivamente. Para el caso de inundaciones menos frecuentes, pero de mayor magnitud, correspondientes a las figuras 16 C) y 16 D), que representan las inundaciones para períodos de retorno de 50 y 100 años, el comportamiento fue similar.

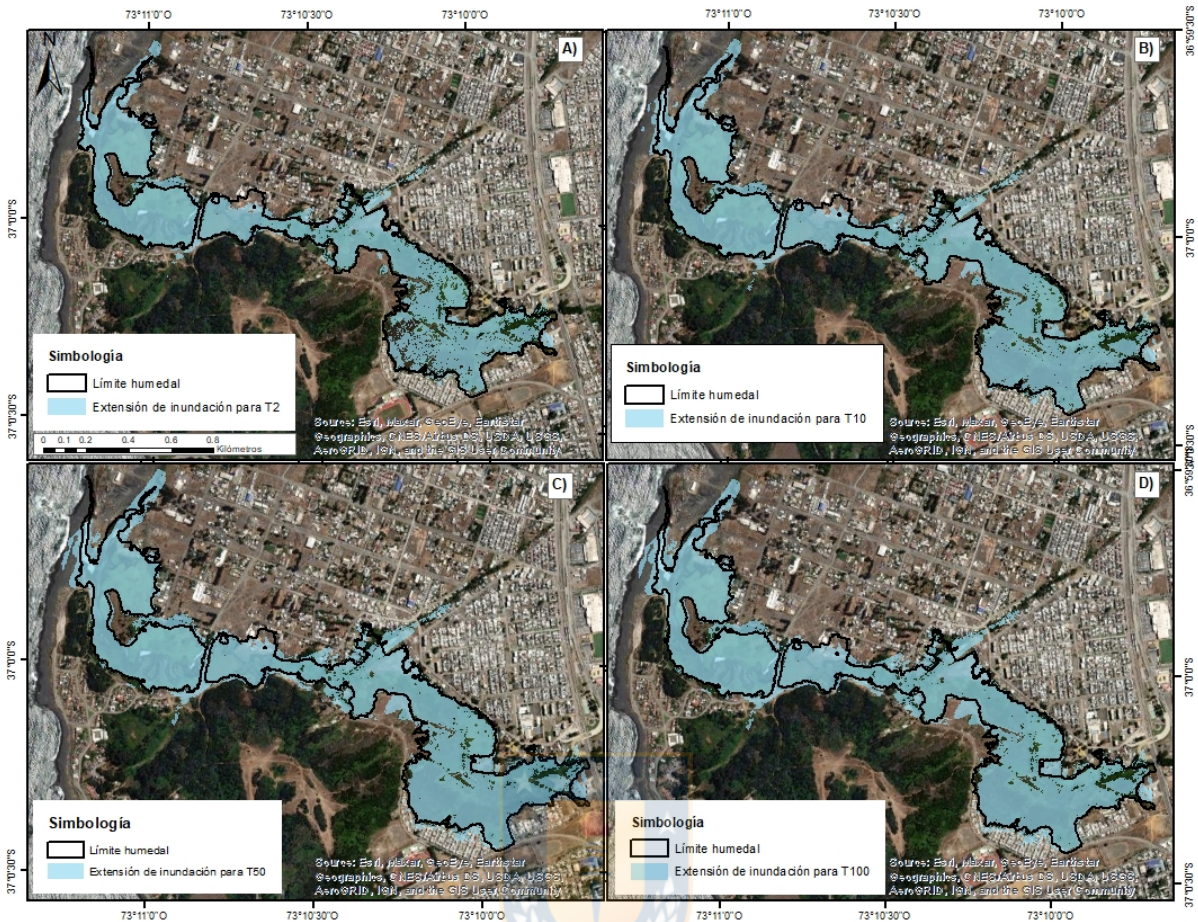


FIGURA N°16: Modelación de la extensión de inundación del humedal Boca Maule.

Fuente: Elaboración propia.

Las modelaciones realizadas muestran superficies afectadas por inundaciones que varían entre 60 y 73 hectáreas, como se muestra en la tabla N°41. Para períodos de retorno de 2 y 100 años, el límite del humedal se ve sobrepasado en un 8% y un 32% respectivamente. Las zonas afectadas se asocian principalmente a los esteros Lagunillas y La Posada con su área urbana adyacente, y los sectores residenciales ubicados en el sector Pedro Méndez, Av. Boca Maule y Los Huilliches.

Tabla N°41: Superficie afectada por inundación según el período de retorno.

Zona de inundación según período de retorno	Superficie afectada (ha)
A) T = 2 años	59,84
B) T = 10 años	66,48

C) T = 50 años	70,95
D) T = 100 años	72,78

Fuente: Elaboración propia.

La validación del modelo se realizó mediante encuestas (ver ANEXO N°6), la respuesta, en general, fue que se inundaba antiguamente, principalmente en invierno, actualmente se puede observar acumulación de agua y generación de barro en basurales; pero no se registran inundaciones en casas por el desborde del humedal, al menos desde el año 2014. Lamentablemente, no fue posible encuestar a habitantes que vivieran ahí desde antes del 2014 en zonas colindantes al humedal, por lo cual, existe un nivel de incertidumbre que debe ser corregido en investigaciones posteriores.

6.3.2. Superficie afectada por inundaciones según la zonificación de los Instrumentos de planificación territorial

A nivel intercomunal el humedal se encuentra zonificado por el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (2017), que lo reconoce como Área de extensión urbana (AU), Área Verde Intercomunal (AVI) y Parque de nivel Intercomunal (PI), según la figura N°12. (ver apartado 6.1.2).

Al comparar la zonificación del PRMC con las zonas de inundación modeladas para crecidas más probables, representadas por períodos de retorno de 2 años (Figura 17a) y crecidas extremas, representadas por períodos de retorno de 100 años (Figura 17b), fue posible cuantificar la superficie afectada por inundaciones, equivalente a 60.4 y 74 hectáreas, respectivamente, que se contrasta con las 48.8 hectáreas de superficie que delimita el instrumento de planificación en el área de estudio.

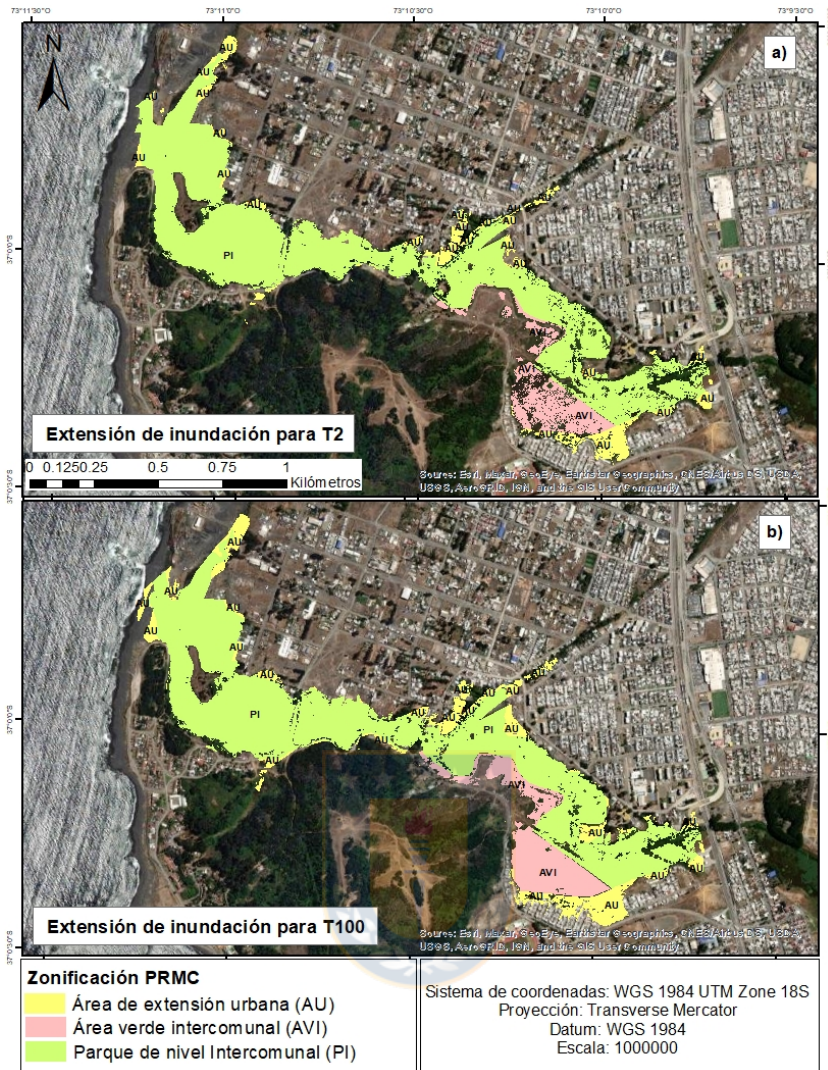


FIGURA N°17: Comparación de zonas de inundación con la zonificación del PRMC (2017).

Fuente: Elaboración propia.

La superficie afectada por inundaciones según la zonificación del PRMC para distintos períodos de retorno se muestra en la tabla N°42.

Tabla N°42: Superficie afectada por inundaciones según zonificación PRMC (2017) para períodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años.

Zonificación PRMC	Sigla PRMC	Superficie (ha) PRMC	Superficie (ha) T=2 años	Superficie (ha) T=10 años	Superficie (ha) T=50 años	Superficie (ha) T=100 años
Área de extensión urbana	AU	220.3	6.34	8.21	10.3	11

Área verde intercomunal	AVI	15.42	6	8.39	9.38	10
Parque de nivel Intercomunal	PI	63,71	48.06	50.54	52	53

Fuente: Elaboración propia.

Al resumir el análisis se obtiene la figura N°18, donde para los escenarios a) y b) la superficie del humedal afectada por inundaciones es considerada principalmente como Parque de nivel Intercomunal (PI), con un 79.6 y 71.6% para T=2 y T=100 años respectivamente, dejando en evidencia que el instrumento no considera criterios hidrológicos en la zonificación del humedal, ya que la categoría de Parque de nivel intercomunal no tiene las mismas normas urbanísticas que aplican a áreas de riesgo de inundación, siendo consideradas como zonas afectas a declaratoria de utilidad pública en conformidad al artículo 69 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, lo que no garantiza que en el área se resguarden las condiciones naturales del humedal, pudiendo ser alterado al permitir construcciones en el área.

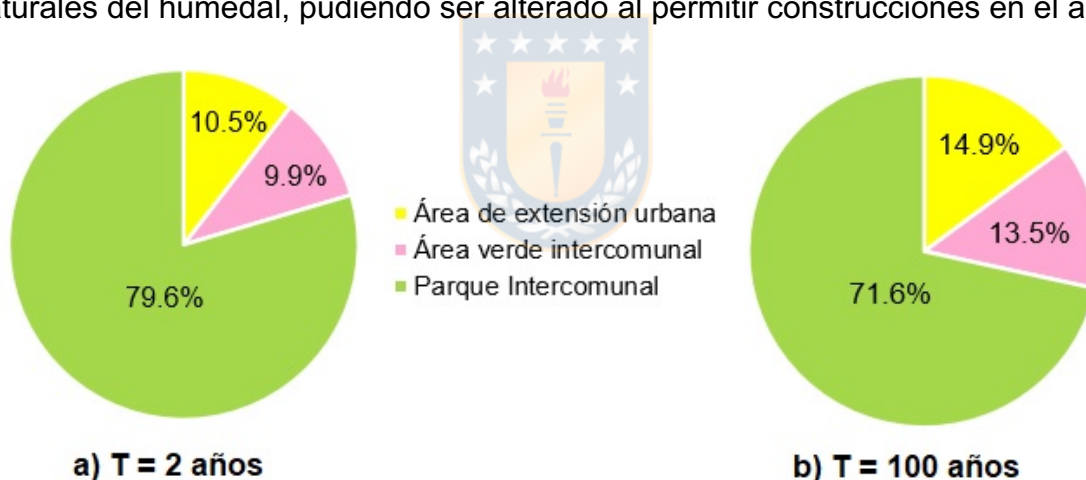


FIGURA N°18: Superficie afectada por inundaciones según zonificación del PRMC.

Fuente: Elaboración propia.

A nivel comunal, el humedal se encuentra zonificado por el Plan Regulador de Coronel (2013) según la figura N°13. (ver apartado 6.1.2).

Al comparar la zonificación del PRC con las zonas de inundación modeladas para crecidas más probables, representadas por períodos de retorno de 2 años (Figura 19a) y crecidas extremas, representadas por períodos de retorno de 100 años

(Figura 19b), fue posible cuantificar la superficie afectada por inundaciones, equivalente a 52.4 y 63.1 hectáreas, respectivamente, que se contrasta con las 45.16 hectáreas de superficie que delimita el instrumento de planificación en el área de estudio.

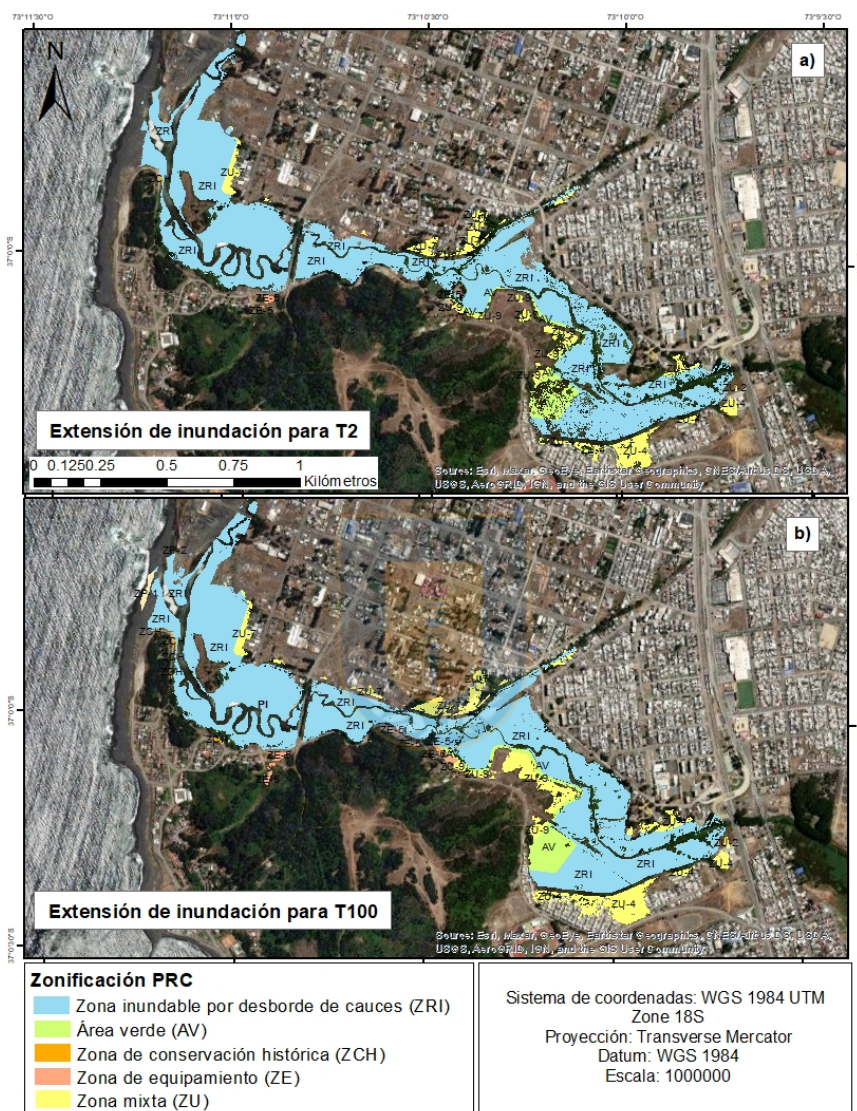


FIGURA N°19: Comparación de zonas de inundación con la zonificación del PRC (2013).

Fuente: Elaboración propia.

La superficie afectada por inundaciones según la zonificación del PRC (2013) para distintos períodos de retorno se muestra en la tabla N°43.

Tabla N°43: Superficie afectada por inundaciones según zonificación PRC (2013) para períodos de retorno 2, 10, 50 y 100 años.

Zonificación PRC	Sigla PRC	Superficie (ha) PRC	Superficie (ha) T=2 años	Superficie (ha) T=10 años	Superficie (ha) T=50 años	Superficie (ha) T=100 años
Zona inundable por desborde de cauces	ZRI	70.46	45.19	48.58	50.42	50.7
Zona de equipamiento	ZE	35.49	0.13	0.24	0.44	0.49
Área verde	AV	3.8	1.94	3.06	3.28	3.29
Zona de conservación histórica	ZCH	14.69	0.018	0.034	0.094	0.11
Zona mixta	ZU	106.48	5.098	6.5	8.14	8.49

Fuente: Elaboración propia.

Al resumir el análisis se obtiene la figura N°20, donde para los escenarios a) y b) la superficie del humedal afectada por inundaciones es considerada principalmente como Zona inundable por desborde de cauces (ZRI), con un 86.28 y 80.37% respectivamente, donde los usos permitidos son de esparcimiento y deporte. En segundo lugar, la superficie afectada se considera como Zona Mixta (ZU), con un 9.73 y 13.46%, respectivamente, donde los usos permitidos son diversos, incluyendo zonas residenciales y de equipamiento. (comercio, educacional, salud, culto y cultura, seguridad, social, deporte).

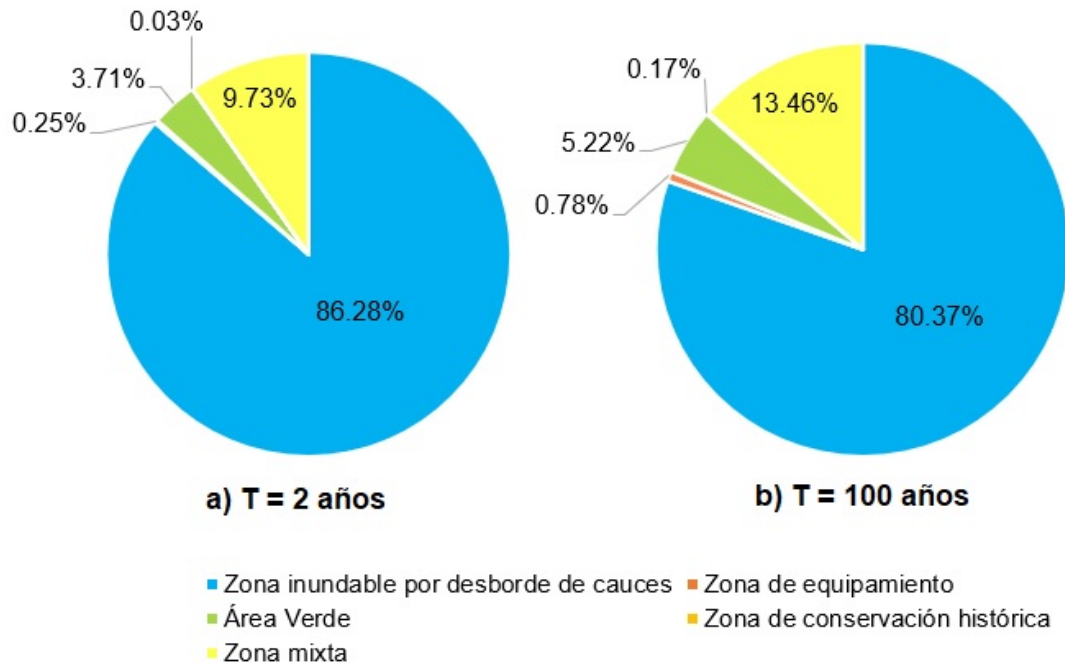


FIGURA N°20: Superficie afectada por inundaciones según zonificación del PRMC.

Fuente: Elaboración propia.

El Plan Regulador Comunal de Coronel considera mayormente el criterio hidrológico al establecer la mayor parte del humedal como zona potencialmente inundable, restringiendo los usos que pudiesen exponer a la población a eventos de inundación. El instrumento considera 48 hectáreas aproximadamente como área inundable, las que se contrastan con las 63 hectáreas que identifica el proyecto Fondecyt URBANCOST II como límite del humedal, por lo tanto, existe una diferencia que debe ser corregida dentro del plan regulador contemplando aquellas zonas de inundación que no han sido consideradas.

7. CONCLUSIONES

En general en los casos internacionales que fueron analizados en el presente estudio, se constató que la utilización de modelaciones hidráulicas en diferentes períodos de retorno es necesaria para definir niveles de peligro de inundación y al ser considerados en los instrumentos de planificación territorial es posible establecer normas urbanísticas compatibles con los procesos de inundación y restringir aquellas que no lo sean, como la urbanización de las llanuras inundables, para prevenir las consecuencias negativas derivadas de eventos de inundación fluvial. Sin embargo, en Chile la normativa aplicada para regular las áreas afectadas por estos eventos no es clara al momento de establecer restricciones urbanísticas, ya que no se definen criterios hidrológicos dentro de los planes reguladores y la identificación de áreas de riesgo de inundación no se realiza de forma homogénea.

A través de los análisis hidrológico e hidráulico fue posible realizar modelaciones de la extensión de inundación asociada al humedal Boca Maule, donde se determinó una zona de inundación que abarca un total de 59.84 (ha) para un período de retorno de 2 años (escenario más probable) y 72.78 ha para un período de retorno de 100 años (escenario más extremo), sobrepasando el límite del humedal en un 8% y 32% respectivamente.

Respecto a lo establecido por los IPT vigentes, la última modificación del Plan Regulador Metropolitano de Concepción identifica el humedal principalmente como Parque de Nivel Intercomunal. Por su parte, el Plan Regulador Comunal de Coronel define el área como una zona potencialmente inundable homogénea. Esta incongruencia en ambos instrumentos deja en evidencia la necesidad de realizar un análisis de peligro a través de modelaciones hidráulicas para diferentes períodos de retorno que permita identificar en qué nivel de peligro se encuentra el humedal y las zonas adyacentes, ya que ambos instrumentos establecen en estas zonas usos permitidos que podrían afectar la capacidad del humedal Boca Maule para regular las inundaciones, lo que en eventos extremos podría derivar en consecuencias negativas para las comunidades humanas aledañas al humedal.

Al realizar una simulación del nivel de peligro de inundación, se sugiere incorporar en investigaciones futuras al modelo de inundaciones el efecto de las mareas, ya que pueden ocasionar una condición de frontera (condición de borde) aguas abajo, dificultando la evacuación de las aguas del humedal, lo que podría ser significativo al momento de identificar aquellas áreas con mayor o menor peligro en el área. Adicionalmente, se sugiere realizar una corrección del modelo de elevación digital con puntos de elevación en terreno, ya que la tecnología LIDAR presenta dificultades en el levantamiento de información topográfica en canales con bajas pendientes, pudiendo alterar la definición de la geometría del cauce utilizada para la simulación hidráulica

Finalmente, la validación del modelo se debe complementar realizando una mayor cantidad de encuestas que permitan recabar información más significativa sobre la recurrencia histórica de las inundaciones en el área de estudio, o realizar aforo en el humedal y los esteros que lo alimentan con el fin de realizar simulaciones para la validación.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, B. (2012). La zona costera chilena: desafíos del ordenamiento territorial. Seminario: Una mirada integral del borde costero de Chile. Ministerio de Bienes Nacionales. Santiago.

BALVANERA, P. et al. (2012), Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services*. Vol. 2, 56-70. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/233823535_Ecosystem_services_research_in_Latin_America_The_state_of_the_art

CAMARGO, S. J., GIULIVI, C. F., SOBEL, A. H., WING, A. A., KIM, D., MOON, Y., STRONG, J. D. O., DEL GENIO, A. D., KELLEY, M., MURAKAMI, H., REED, K. A., SCOCCIMARRO, E., VECCHI, G. A., WEHNER, M. F., ZARZYCKI, C., & ZHAO, M. (2020). Characteristics of Model Tropical Cyclone Climatology and the Large-Scale Environment, *Journal of Climate*, 33(11), 4463-4487. Recuperado de: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/11/jcli-d-19-0500.1.xml>

CASTELLET, E., CEA, L., & CORESTEIN, G. (2014). Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del agua*, 18(1), 71-82. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3144>

CLARKSON, B, AUSSEIL, A & GERBEAUX, P. (2013). Wetland Ecosystem Services. *Wetland Ecosystem Services*, 1(14), 192-202. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/260436894_Wetland_ecosystem_services

COSTANZA, ROBERT & ARGE, & GROOT, RUDOLF & FARBERK, STEPHEN & GRASSO, MONICA & HANNON, BRUCE & LIMBURG, KARIN & NAEEM, SHAHID & NEILL, ROBERT & PARUELO, JOSÉ & RASKIN, ROBERT & SUTTON, PAUL & BELT, MARJAN. (1997). The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*. 387. 253-260. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/229086194_The_Value_of_the_World's_Ecosystem_Services_and_Natural_Capital

COWARDIN, L. M., V. CARTER, F. C. GOLET, AND E. T. LAROE. (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U.S. Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-79/31. Washington, DC.

D.F.L. N°458 de 1976. Ley General de Urbanismo y Construcciones. 13 de abril de 1976. Recuperado de: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=13560>

DAVIDSON, N.C. (2014). How much wetland has the world lost? Longterm and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10), 934-941.

Decreto 399/2015 Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de las Ciudades de Lota y Coronel, Región de Biobío. Recuperado de: <https://www.bcn.cl/leychile/Navegar?idNorma=1074770>

DÍAZ, I, SEDAS, E & BURGUILLO, M. (2018). Servicios ecosistémicos en humedales. [Libro electrónico]. GM-Espejo Imagen S.A de C.V. Recuperado de: <http://antar.ciencias.uchile.cl/wp-content/uploads/2018/12/humedales.pdf>

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2018) INTERVIEW – The Dutch make room for the river. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2018-contentlist/articles/interview-2014-the-dutch-make>

FERRANDO, A. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo* N°15, Santiago de Chile, publicación electrónica editada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U. de la Universidad de Chile. Recuperado de: https://web.uchile.cl/vignette/revistaurbanismo/CDA/urb_complex/0,1311,SCID%253D19141%2526ISID%253D668%2526IDG%253D2%2526ACT%253D0%2526PR T%253D19141,00.html

GOBIERNO DE NAVARRA. (2011). Plan de Ordenación Territorial. Eje 5. Criterios relativos a la zonificación de áreas inundables y usos admisibles en las mismas. Recuperado de: <http://www.nafarroa.gob.es/NR/rdonlyres/4977EBBE-E49C-4004-B92A-66C5C373C9CA/193380/PN995.pdf>

GÓMEZ-BAGGETHUN, E & BARTON, D. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180091200362X>

IPCC. (2012) – Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.) Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, 582 pp

JINDAL, B. (2015). Competición de resiliencia para afrontar desastre natural. Oficina de Desarrollo Comunitario de Luisiana. Unidad de Recuperación tras un desastre. Luisiana, USA. Recuperado de: https://www.doa.la.gov/OCDDRU/Disasters/NDRC/NDRC_PhaseI_Spanish.pdf

KNIGHT, D.W. (2013). River hydraulics – a view from midstream. *Journal of Hydraulic Research*, 51(1), 2-18.

KUMAR, R, TOL, S, MCINNES, R, EVERARD, M & KULINDWA, A. (2017). Humedales para la reducción del riesgo de desastres: Opciones eficaces para comunidades Resilientes. Nota sobre políticas n°1. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.

LEY N°21.202. Diario Oficial de la República de Chile, 23 de enero de 2020. Recuperado de: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1141461>

MARDONES, M, & VIDAL, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. *EURE (Santiago)*, 27(81), 97-122. Recuperado de: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612001008100006&script=sci_abstract

MARTÍNEZ, L. (2004). Análise do efeito do risco de cheia no valor de imóveis pelo método dos preços hedônicos (tesis inédita). Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, Brasil. Recuperado de: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/33713>

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). (2005). Ecosystem and human well-being: Wetlands and water synthesis. Washington, D.C. World Resources Institute.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MMA). (2015). "Medio Ambiente dice que en Chile hay 30 mil humedales". Recuperado de: <http://portal.mma.gob.cl/medio-ambiente-dice-que-en-chile-hay-30-mil-humedales/>

MINISTRY OF HOUSING, COMMUNITIES & LOCAL GOVERNMENT. (2012). Technical Guidance to the National Planning Policy Framework. Reino Unido. Recuperado de: <https://www.gov.uk/government/publications/national-planning-policy-framework-technical-guidance>

MISTCH, W & GOSSELINK, J. (2015). Wetlands. 5th ed. New York EEUU, John Wiley & Sons, Inc.

MOP-DGA. (1991). Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días. Centro de Información de Recursos Naturales CIREN. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/6582>

MOP-DGA. (1995). Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica. Centro de Información de Recursos Hídricos CIRH /DGA.

MUNICIPALIDAD DE CORONEL. (2012). Plan Maestro de Recuperación urbana del humedal Boca Maule. Recuperado de: https://www.academia.edu/35521750/PLAN_MAESTRO_RECUPERACION_HUMEDAL_BOCA_MAULE.pdf

MUNICIPALIDAD DE SAN PEDRO DE LA PAZ & CENTRO EULA-CHILE. (2018) Atlas de riesgos naturales y antrópicos comuna San Pedro de la Paz. Recuperado de: <http://editorial.udec.cl/?q=node/110>

OLLERO, A. (1997). Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico. Lurralde. 20. 261-283. Recuperado de: <http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/200oller/ollero20.htm>

PADMAVATHI, P, KANDRU, A, MISHRA, S, VHANALAKAR, S & SRINU, G. (2017). Wetlands of India: Biodiversity Ecological Services and Strategies for Conservation. Biodiversity Assessment: Tool for Conservation. 15, 189-204. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/328569735 Wetlands of India Biodiversity Ecological Services and Strategies for Conservation](https://www.researchgate.net/publication/328569735_Wetlands_of_India_Biodiversity_Ecological_Services_and_Strategies_for_Conservation)

RAMSAR. (2015). Nota informativa Ramsar 7: Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas, una recopilación de análisis recientes. Recuperado de: <https://ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>

RAMSAR. (2015). Nota informativa Ramsar 7: Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas, una recopilación de análisis recientes. Recuperado de: <https://ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>

ROJAS, C, MUNIZAGA, J, ROJAS, O, MARTÍNEZ, C & PINO, J. (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. Land Use Policy. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717316289>

ROJAS, C, MUNIZAGA, J, ROJAS, O, MARTÍNEZ, C & PINO, J. (2019). Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. Land Use Policy. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837717316289>

ROJAS, C. (2018). Desafíos en la Planificación Territorial: Humedales Urbanos una oportunidad de gestión y participación para ciudades más sustentables y resilientes. La Vía Medioambiental: Desafíos y proyecciones para un Chile futuro. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/323779795 Desafios en la Planificación Territorial Humedales Urbanos una oportunidad de gestion y participacion para ciudades mas sustentables y resilientes](https://www.researchgate.net/publication/323779795_Desafios_en_la_Planificacion_Territorial_Humedales_Urbanos_una_oportunidad_de_gestion_y_participacion_para_ciudades_mas_sustentables_y_resilientes)

ROJAS, C. (2020). Humedales Urbanos en Chile: Impacto en políticas públicas y Desarrollo Sostenible. Humedales Urbanos: Historia de una ley pionera y ciudadana. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/340267027_Humedales_Urbanos_en_Chile_Impacto_en_políticas_publicas_y_el_Desarrollo_Sostenible

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. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071834022014000100012

ROJAS, O. (2015). Cambios ambientales y dinámicas de inundaciones fluviales en una cuenca costera del centro sur de Chile. Tesis doctoral, Universidad de Concepción. Repositorio académico de la Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/11594/1773>

SMITH, R Y ROMERO, H. (2009). Efectos del crecimiento urbano del Área Metropolitana de Concepción sobre los humedales de Rocuant-Andalién, Los Batros y Lenga. Revista de geografía Norte Grande. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022009000200005

TUCCI, C. (1998). Drenagem urbana: gerenciamento, simulação, controle. Porto Alegre, Brasil: Editora da UFRGS. Recuperado de: <http://rhama.com.br/blog/wp-content/uploads/2017/01/GEREN02.pdf>

VIDAL, C. Y 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. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118084>

9. ANEXOS

ANEXO N°1: Infraestructura según vulnerabilidad en zonas de riesgo en Reino Unido según “Technical Guidance to the National Planning Policy Framework”

<p>Infraestructura esencial</p> <ul style="list-style-type: none">- Infraestructura de transporte esencial (incluidas las rutas de evacuación masiva) que debe atravesar la zona de riesgo.- Infraestructura de servicios públicos esenciales, que deben ubicarse en una zona de riesgo de inundación por razones operativas, incluidas las centrales generadoras de electricidad y plantas de tratamiento de agua que deben permanecer operativas en tiempos de inundación.
<p>Vulnerabilidad alta</p> <ul style="list-style-type: none">- Estaciones de policía, ambulancias y bomberos, centros de comando y telecomunicaciones que deben estar operativas durante las inundaciones.- Puntos de dispersión de emergencias.- Viviendas en sótanos.- Caravanas/casas rodantes destinadas a uso residencial permanente.- Instalaciones que requieran almacenar sustancias peligrosas. (cuando exista una necesidad demostrable de ubicar instalaciones para el almacenamiento a granel de materiales en instalaciones portuarias u otras similares, o tales instalaciones con infraestructura energética o instalaciones de captura y almacenamiento de carbono, que requieran ubicaciones costeras o cercanas al agua, o que necesiten ubicarse en otras áreas de alto riesgo de inundaciones, en estos casos las instalaciones deben clasificarse como “infraestructura esencial”).
<p>Más vulnerable</p> <ul style="list-style-type: none">- Hospitales.- Instituciones residenciales como hogares de ancianos, niños, servicios sociales, cárceles y albergues.- Edificios destinados a viviendas, residencias estudiantiles, establecimientos de bebidas, clubes nocturnos y hoteles.- Usos no residenciales para servicios de salud, guarderías y establecimientos educativos.- Vertederos y sitios utilizados para instalaciones de gestión de residuos peligrosos.- Sitios utilizados para caravanas de vacaciones o de corta estancia y campamentos, sujetos a un plan específico de alerta y evacuación.
<p>Menos vulnerable</p> <ul style="list-style-type: none">- Estaciones de policía, ambulancia y bomberos que no requieran estar operativas durante inundaciones.- Edificios destinados al comercio, servicios financieros, profesionales y otros, restaurantes y cafés, comida caliente para llevar, oficinas, industria en general,

<p>almacenamiento y distribución, instituciones no residenciales que no estén incluidas en infraestructura “más vulnerable”, y montaje y esparcimiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Terrenos y edificios destinados a la agricultura y silvicultura. - Tratamiento de residuos (excepto vertederos e instalaciones de residuos peligrosos) - Tratamiento y procesamiento de minerales (excepto para el trabajo de arena y grava). - Obras de tratamiento de agua que no necesiten permanecer operativas en época de inundaciones. - Obras de tratamiento de aguas residuales.
<p>Desarrollo compatible con el agua</p> <ul style="list-style-type: none"> - Infraestructura de control de inundaciones. - Infraestructura de transmisión de agua y estaciones de bombeo. - Infraestructura de transmisión de aguas residuales y estaciones de bombeo. - Trabajos de arena y grava. - Muelles y embarcaderos. - Facilidades de navegación. - Instalaciones del Ministerio de Defensa. - Construcción, reparación y desmantelamiento de barcos, procesamiento y refrigeración de pescado en los muelles y actividades compatibles que requieran ubicarse junto al agua. - Recreación acuática (excluidos los lugares para dormir). - Estaciones de socorrismo y guardacostas. - Espacios abiertos, conservación de la naturaleza y biodiversidad, deportes al aire libre y recreación. - Alojamiento auxiliar para dormir o residencia esencial para el personal requerido por los usos en esta categoría, sujeto a un plan específico de alerta y evacuación.

ANEXO N°2: Parámetros estadísticos de análisis de frecuencia para los datos meteorológicos de la estación Carriel Sur.

Distribución	Parámetros
Gen. Extreme Value	k=0,14995 s=21,562 m=56,359
Gumbel Max	s=25,194 m=57,984
Lognormal	s=0,40409 m=4,199
Lognormal (3P)	s=0,65333 m=3,6895 g=23,449
Normal	s=32,312 m=72,527
Pearson 5	a=6,6413 b=409,6
Pearson 5 (3P)	a=4,7672 b=238,01 g=10,015

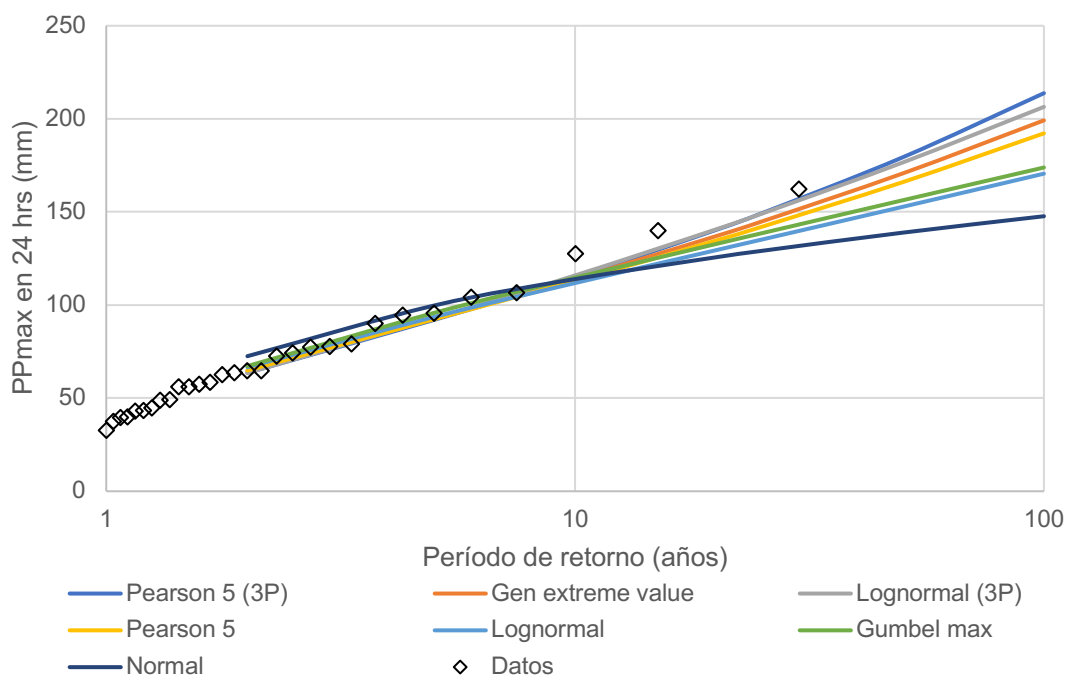
ANEXO N°3: Análisis de frecuencia para los períodos de retorno de 2 hasta 100 años de la estación metereológica Carriel Sur.

PP Máx en 24 hrs (mm), Distribución							
T(años)	Gen. extreme value	Gumbel Max	Lognormal	Lognormal (3P)	Normal	Pearson 5	Pearson 5 (3P)
2	64,48	67,22	66,62	63,47	72,53	64,9	63,64
5	92,63	95,77	93,61	92,82	99,72	92,37	92
10	114,07	114,68	111,82	115,91	113,94	112,96	114,9
20	137,04	132,81	129,5	140,68	125,68	134,68	140,38
25	144,86	138,57	135,16	149,07	129,1	142,01	149,27
50	170,7	156,29	152,77	176,58	138,89	166,02	179,37
100	199,19	173,88	170,56	206,43	147,7	192,22	213,79

ANEXO N°4: Distribuciones de frecuencia para la precipitación máxima en 24 hrs para la estación Carriel Sur.



DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA PARA LA PPmax EN 24 HRS PARA LA ESTACIÓN CARRIEL SUR

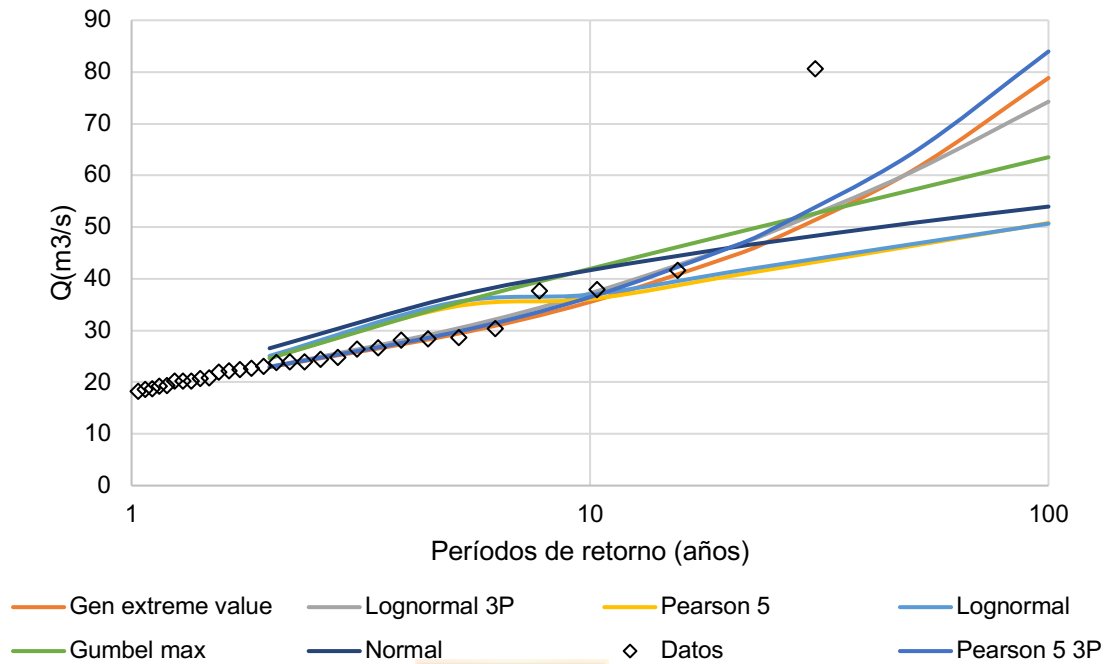


ANEXO N°5: Análisis de frecuencia para los períodos de retorno de 2 hasta 100 años de las estaciones fluviométricas.

- **Estero Bellavista en Tomé**

Qmax (m3/s), Distribución							
T(años)	Gen. extreme value	Gumbel Max	Lognormal	Lognormal (3P)	Normal	Pearson n 5	Pearson 5 (3P)
2	22.932	24.624	25.088	22.97	26.56	24.722	22.958
5	29.147	35.037	35.352	30.147	36.476	34.54	29.538
10	35.517	41.93	36.95	37.196	41.659	36.067	36.449
20	44.154	48.543	41.237	45.938	45.94	40.468	45.895
25	47.564	50.641	42.577	49.155	47.187	41.881	49.634
50	60.703	57.102	46.659	60.54	50.757	46.298	64.055
100	78.845	24.624	50.665	74.259	53.969	50.801	83.97

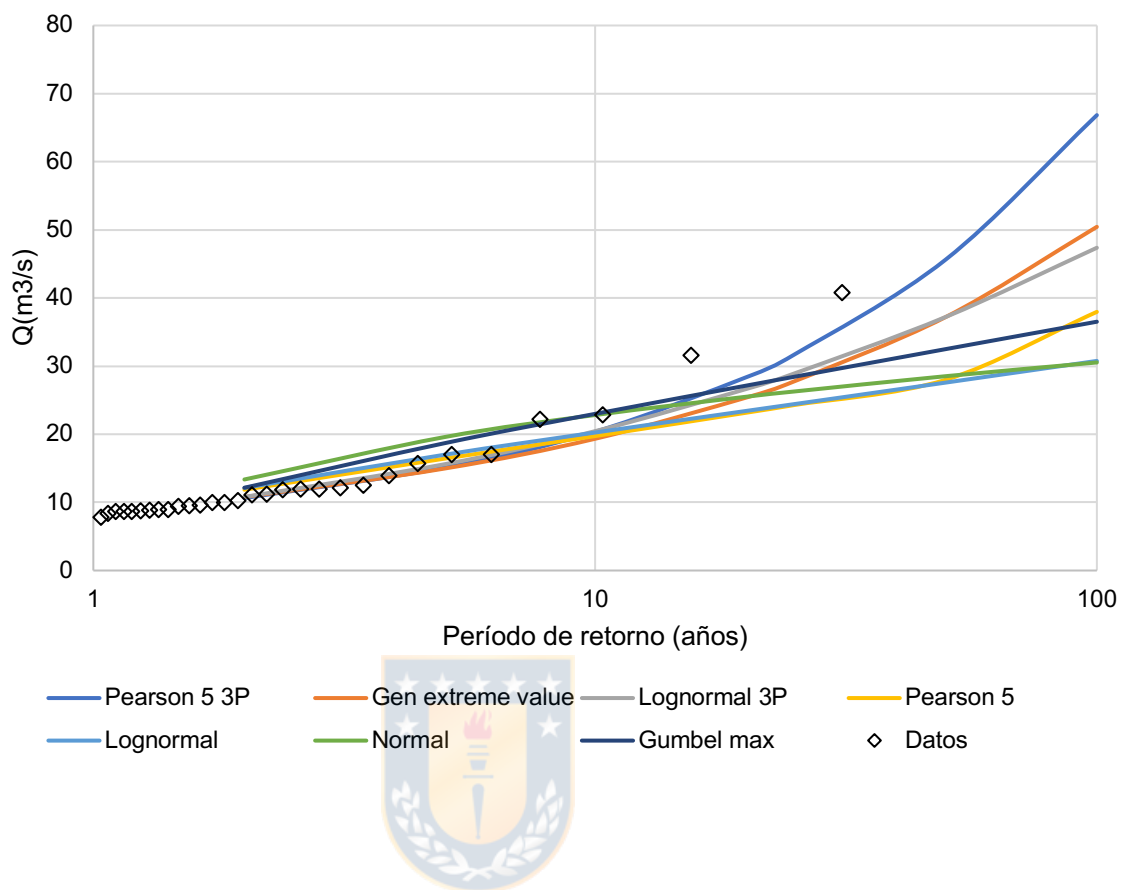
DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA PARA LOS CAUDALES MÁXIMOS DE LA ESTACIÓN ESTERO BELLAVISTA



- Estero Nonguén frente U. del Biobío

Qmax (m3/s), Distribución							
T(años)	Gen. extreme value	Gumbel Max	Lognormal	Lognormal (3P)	Normal	Pearson n 5	Pearson 5 (3P)
2	10.779	12.147	12.126	10.806	13.36	11.857	10.637
5	14.956	18.672	16.982	15.585	19.574	16.412	15.08
10	19.336	22.992	20.252	20.453	22.822	19.731	20.366
20	25.382	27.135	23.421	26.639	25.504	23.16	28.364
25	27.797	28.45	24.434	28.948	26.285	24.302	31.736
50	37.213	32.499	27.585	37.223	28.523	27.999	45.651
100	50.444	36.518	30.765	47.373	30.536	37.964	66.838

DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA PARA LOS CAUDALES MÁXIMOS DE LA ESTACIÓN ESTERO NONGUÉN



ANEXO N°6: Resultado encuestas de validación del modelo de inundación.

Lugar	Consultado	Inundación por desborde de cauce
148	No aplica	No aplica
149	No aplica	No aplica
150	No aplica	No aplica
151	No aplica	No aplica
152	Patricio	No sabe, vive desde 2015 ahí, pero hay mucho barro y se acumula agua
153	Sra Inelde	Antes se inundaba, ahora ya no ha pasado
154		
155	Negocio - Andrea	No sabe, generalmente cuando llueve se inundan los basurales
156		
157		No aplica

158	No fue posible contactar a alguien	
159	No aplica	No aplica
160		
161		
162	Hay casas, pero no fue posible contactar a nadie (4 casas aproximadamente)	No aplica
163	Hay casas, pero no fue posible contactar a nadie (4 casas aproximadamente)	No aplica
164	No aplica	No aplica
165	No aplica	No aplica
166	Don Pedro Lobos	Se inundaba, generalmente en invierno, pero no las casas
167		
168	Trabajadores de la construcción	Al otro lado se inunda
169		
170	Trabajadores de la construcción	No nada, al otro lado donde estaban las canchas
171		
172	Andrés	No nunca desde el 2014 al menos
173		
174		