



Cartas de Inundación por crecida Río Rapel

Comuna de Navidad – Región de O'Higgins

Documento explicativo

Preparado por: Pamela Tapia – Pablo Avalos
Dirección Regional ONEMI O'Higgins

Pedro de Valdivia N° 150, Rancagua, Chile

www.onemi.gov.cl

www.repositoriodigitalonemi.cl





Como citar este documento:

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), Dirección Regional O'Higgins; Tapia, Pamela; Avalos, Pablo. *Carta de Inundación por crecida Río Rapel*, Rancagua, Chile, ONEMI, 2015. 61 p.

Palabras clave: INUNDACIÓN – COMUNA DE NAVIDAD – DESBORDE – DOCUMENTOS TÉCNICOS – DOCUMENTOS CIENTÍFICOS – PROTECCIÓN CIVIL – REDUCCIÓN DE RIESGO DE DESASTRE.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	General.....	4
1.2	Descripción de la cuenca del río Rapel.....	7
1.3	Recurrencia histórica inundaciones fluviales zona centro de Chile.....	9
2.	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo General	12
2.2	Objetivos Específicos.....	12
3.	ÁREA DE ESTUDIO	13
4.	METODOLOGÍA.....	14
4.1	Aspectos teóricos de la Evaluación Multicriterio (EMC).	14
4.2	Etapa de Gabinete.....	15
4.3	Etapa de Terreno.....	16
4.4	Procesamiento Cartográfico.....	17
4.5	Evaluación Multicriterio.....	20
4.5.1	Ponderación y Suma de Variables:	20
5.	RESULTADOS.....	23
5.1	Análisis de caudales para estimar las condiciones iniciales de inundación.....	23
5.2	Estimación del área de inundación año 2006.	26
5.3	Estimación de las zonas de peligro en caso de una crecida del río (P).	28
5.3.1	Variables y Riesgo:	28
5.4	Estimación de las consecuencias de la inundación año 2006. (C).....	30
5.5	Estimación grado exposición de la población frente a una crecida del río. (E)	31
5.5.1	Variables y Riesgo:	31
5.6	Ponderación y Razón de Consistencia.	32
5.6.1	Peligro (P):.....	32
5.6.2	Consecuencias (C):.....	33
5.6.3	Exposición (E):.....	34
5.7	Categorías y Cartografías.	34
6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	39
6.1	Análisis de los Factores de Riesgo de Inundación.....	39

6.2	Áreas Urbanas en Riesgo de Inundación.....	40
6.3	Situación de Riesgo por Localidad.....	43
6.3.1	Localidad de Rapel de Navidad.....	43
6.3.2	Localidad de Piuchen.....	44
6.3.3	Localidad de Rucatalca.....	45
6.3.4	Localidad de El Bajío.....	46
6.3.5	Localidad de La Vega de La Boca.....	47
6.3.6	Localidad de La Boca.....	48
6.4	Percepción de la Población Local.....	49
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
8	BIBLIOGRAFÍA.....	55
9	ANEXOS.....	57

1 INTRODUCCIÓN

1.1 General

Las inundaciones son un proceso natural o inducido por la acción humana, por el cual el flujo de un río desborda los límites de su cauce, deviniendo en peligro o amenaza cuando existen asentamientos humanos que ocupan antiguos lechos de inundación. Al materializarse la amenaza, se producen emergencias y desastres, iniciándose con ello el conflicto entre el sistema natural y social (Rojas et al., 2014; Ollero, 1997).

Los factores desencadenantes de las inundaciones pueden estar relacionadas con diversas causas tales como: precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, fusión de nieve y hielo, descarga de aguas represadas por glaciares, procesos de remoción en masa, rotura o mal funcionamiento de embalses, relaves mineros o infraestructura hidráulica, además de crecidas asociadas a erupciones volcánicas (Rojas et al., 2014).

Dependiendo de la intensidad y duración del fenómeno, la magnitud de los daños producidos, depende de múltiples factores, siendo los más importantes: altura media de agua y/o altura local de agua en la zona inundada, velocidad de escurrimiento, época del año en que sucede la inundación, tiempo transcurrido desde la inundación anterior (frecuencia) y duración de las mismas (Rojas et al., 2014). Estos factores pueden ser evaluados en la planificación y diseño de obras de ingeniería, si se cuentan con registros estadísticos de precipitaciones, pues a partir de ellos se puede elaborar curvas de daños versus factores determinantes.

Pero en general, los registros estadísticos no dimensionan la temporalidad e impacto de este tipo de fenómeno natural. Por ejemplo, el sistema frontal que afectó entre el 24 al 26 de marzo 2015 a la Región de Atacama, es una clara evidencia de que el diseño de obras de ingeniería en base al último evento de importancia - abril 1997- no aseguró la resiliencia de la infraestructura pública frente a este evento torrencial sin data histórica, y que desencadenó una serie de aluviones que destruyeron gran parte de las localidades de Diego de Almagro, El Salado, Chañaral y ciudad de Copiapó (ONEMI, 2015).

Es importante considerar que los ríos en función de su tiempo de activación, siempre vuelven a su lecho de inundación original, pues es el cauce natural del flujo mezcla de agua, vegetación y lodo que no solo erosiona y profundiza el lecho sino que, además, socava los márgenes y origina el desprendimiento de grandes masas de tierra, que son rápidamente disgregadas y unidas al flujo existente. El flujo adquiere volumen y velocidad, arrastrando cualquier elemento que se interponga a su paso, decantándolos posteriormente en la zona plana

inmediatamente después de abandonar la pendiente cordillerana, continuando solo el flujo de agua que escurre al mar hasta perder energía.

Figura 1: Efectos de la inundación del río Salado en la ciudad de Chañaral, marzo 2015.



Fuente: <http://www.elquehaydecerto.cl/> (Foto: Twitter @Negritaavs).

Respecto a las inundaciones derivadas de la acción humana, estas son provocadas por la rotura, mal manejo o vaciamiento repentino de infraestructura hidráulica (ej. falla de compuerta de tranques, exceso de caudal en embalses, falta de limpieza de canales, etc.). Estos procesos actúan en ocasiones combinados, generando crecidas o pulsos de agua en un muy corto período de tiempo, incluso horas, implicando un riesgo permanente para la seguridad y resiliencia de los asentamientos localizados aguas abajo de grandes embalses y centrales hidroeléctricas (Rojas et al., 2014; Ollero, 1997).

Lamentablemente, casos de inundaciones con consecuencias desastrosas en la población hay muchos, siendo el más connotado últimamente para Latinoamérica, el colapso de la represa Camarán, estado de Paraíba, Brasil, que en el año 2004 con sólo dos años de existencia, se resquebrajó e inundó las poblaciones de Alagoa Grande y Mulungu, muriendo cinco personas y 800 familias quedaron sin hogar (www.internationalrivers.org).

Otro caso relevante, es la inundación provocada por el vaciamiento repentino de la Central Hidroeléctrica Rapel, durante la madrugada del 12 de julio del 2006, cuya evacuación estimada de $6.600 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua en un período corto de horas, desbordó y anegó aguas abajo, las localidades

de Rapel, El Bajío, Piuchén, La Vega y La Boca, comuna de Navidad, con distinto grado de afectación a personas, viviendas y predios, afortunadamente sin registro de muertes y dejando un saldo de 148 damnificados.

Figura 2: Amplitud de la inundación del río Rapel, sector La Boca de Rapel, julio 2006.



Fuente: I. Municipalidad de Navidad, 2006.

Este evento ya había sido datado en los años 1975, 1982, 1985, 1986, 1992 y 1997, con consecuencias similares en amplitud. Por tanto, su recurrencia demuestra la vulnerabilidad de la población residente aguas abajo de esta represa, motivo por el cual organismos públicos han estado en coordinación para evaluar el riesgo de inundación, principalmente cuando deviene un sistema frontal de importancia.

A fines del año 2008, se publicó en el Diario Oficial de la República la Ley N°20.304, sobre operación de embalses frente a alertas y emergencias de crecida. En el mencionado texto legal previene que la declaración del estado de alerta de crecidas para una determinada zona del país, debe ser notificada por la ONEMI al Intendente respectivo, a la o las municipalidades respectivas, al Ministerio de Energía, a la Dirección General de Aguas (DGA), al Sistema Interconectado Central (SIC) y a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Asimismo, se dejó establecido que para la Declaración de Condición de Alerta de Crecidas, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), informará a ONEMI y DGA sobre sus pronósticos meteorológicos con una antelación de al menos 3 días, para las zonas de localización de embalses. Así también, DGA informará diariamente a la ONEMI los caudales en las estaciones que estén bajo su operación, y otra información meteorológica relevante que disponga (ej. nieve acumulada) para poder evaluar el riesgo de áreas vulnerables en las cuencas de los embalses.

Es en este contexto, que en el año 2008 ONEMI en conjunto con la Central Hidroeléctrica Rapel de ENDESA, DGA y Municipalidad de Navidad, logran elaborar un Protocolo de Emergencia para hacer frente a una probable crecida y eventual evacuación de la población, siendo responsable ENDESA de avisar con antelación de horas a los organismos técnicos y de protección civil para que coordinen las acciones respectivas de protección a la población.

Durante el año 2014, las instituciones involucradas acuerdan actualizar el Protocolo de Emergencia definido con antelación, y dentro de esto actualizar la cartografía de riesgo de inundación para las localidades ribereñas del Rapel, insumo que apoyará el Plan de Emergencia Comunal frente a contingencias de este tipo, así como crear marcos de ordenación territorial que permitan al municipio regular el uso de suelo de borde río, disminuyendo la vulnerabilidad de la población local.

En concreto, el objetivo de este estudio fue elaborar la cartografía de las zonas potencialmente inundables a lo largo del río Rapel, a través del uso de herramientas SIG y métodos de evaluación multicriterio. Para validar el modelo, se visitó en terreno el área afectada por la inundación de julio 2006, buscando las trazas o vestigios de este evento, y se entrevistó a testigos directos del desastre, a fin de estimar el área de máximo riesgo probable. Este escenario extremo fue considerado para elaborar la carta de inundación del río Rapel.

1.2 Descripción de la cuenca del río Rapel

La cuenca hidrográfica del río Rapel está ubicada en la costa norte de la Región de O'Higgins y se extiende aproximadamente entre los paralelos 33°53' y los 35°01' de Latitud Sur, con una extensión desde el muro de coronamiento del embalse Rapel a la desembocadura del mar, de 483,91km² (DGA, 2004).

El río Rapel se forma de la unión de los ríos Cachapoal y Tinguiririca, en el lugar denominado La Junta, a unos 6 km al oeste de la localidad de Las Cabras. La confluencia tiene lugar en el interior de la Cordillera de la Costa y se encuentra hoy inundada por las aguas del embalse Rapel con una capacidad de 680 millones de m³ para fines hidroeléctricos. Desde La Junta, el río Rapel corre hacia el noreste, en medio de un lecho obstruido por depósitos fluviales. Desemboca en el mar, en el pueblo de La Boca, a través de un solo cauce de unos 60 m de ancho. En su recorrido, no recibe afluentes de importancia, siendo el de mayor significación el estero Alhué (DGA, 2004).

El río Rapel pertenece al dominio climático mediterráneo (32° - 38° Lat. S), cuya característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas moderadas producto de la influencia del mar. En Rapel de Navidad se registra una temperatura media anual de 14°C sin grandes contrastes térmicos. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 28°C durante el día (DGA, 2004)

Los valores de pluviometría en un año normal varían en torno a los 500 mm/año, pero estos valores han ido decreciendo en los últimos años, situación consistente a lo ocurrido a nivel de cambio climático regional que pronostica un déficit de precipitación. Por otra parte, el patrón de lluvias ha tendido a concentrarse en un breve tiempo, aumentando con ello la intensidad de las precipitaciones y generando aumentos repentinos del nivel de caudal y activación torrencial de quebradas.

En términos de caudales, el gasto medio anual del río Rapel en la Estación de Corneche, aguas abajo del embalse, es de 162 m³/s, considerando un período de 30 años anterior al funcionamiento de la Central Rapel (DGA, 2004).

El embalse Rapel es el regulador artificial de los regímenes de descarga y gradientes de los ríos tributarios. Esta obra hidráulica perteneciente a la empresa ENDESA Chile S.A., con un caudal de diseño de 535 m³/s utilizado para abastecer de energía al Sistema Interconectado Central (SIC); sin embargo, el caudal medio anual utilizable en un año medio es de 178 m³/s (DGA, 2004).

Frente a las condiciones de alteración de cauces y caudales, variabilidad y escasez de precipitaciones, la estacionalidad de los ríos del sector muestran una distribución más homogénea durante los deshielos, mostrando un ascenso moderado del nivel de las aguas. Por tanto, para los recursos hídricos disponibles en la cuenca aguas abajo de la Central Rapel, se indica que:

- Los caudales fluctúan en un rango muy bajo.
- La onda de deshielo en períodos de sequía tiende a desaparecer y los caudales tienden a ser más constantes.
- Debido a la diferencia de precipitaciones entre el sector cordillera y costa, los ríos del primer sector tienen una relación más directa entre la precipitación anual y la onda de deshielo.

1.3 Recurrencia histórica inundaciones fluviales zona centro de Chile

En los últimos 50 años (período 1960 – 2010), en Chile se han registrado 18 inundaciones catastróficas relacionadas con eventos pluviométricos, de los cuales el 70% afecta la zona central, lugar donde se concentra el 73% de la población nacional (Rojas et al., 2014; INE, 2012). La mayor recurrencia de inundaciones se asocia a sistemas frontales, explicado tanto por los montos pluviométricos extremos, como por los profundos cambios ambientales experimentados en las últimas décadas, como el avance de la desertificación, erosión de suelos, tala de bosques, expansión de la superficie agrícola y urbana (Rojas et al., 2014; Ollero, 1997).

En general, esta estadística no considera la totalidad de las inundaciones ocurridas a lo largo del país, ya sea por tamaño o porque ocurren en zonas con menor cobertura de medios de comunicación. Por tanto, se puede intuir un mayor número de eventos en función del análisis de los registros de presencia del fenómeno del Niño o ENOS en nuestras costas, tal como lo muestra la tabla 1, donde indica la clasificación de la etapa del ENOS (Niño, Niña o Neutro) y su intensidad (FU: Fuerte, MO: Moderado, DE: Débil).

Tabla 1: Recurrencia histórica inundaciones Chile Central.

Año	ENOS	Intensidad
1950	Niña	DE
1951	Niño	MO
1952	Neutro	
1953	Niño	MO
1954	Niña	MO
1956	Niña	DE
1957	Niño	MO
1958	Niño	DE
1961	Neutro	
1962	Neutro	
1963	Niño	MO
1965	Niño	MO
1966	Neutro	
1967	Neutro	
1969	Niño	MO
1970	Niña	MO
1971	Niña	FU
1972	Niño	FU
1974	Niña	
1975	Niña	
1977	Neutro	DE
1978	Neutro	
1980	Neutro	
1981	Neutro	
1987	Niño	
1992	Niño	
1997	Niño	FU
2001	Neutro	
2003	Neutro	
2006	Niño	MO
2008	Neutro	

Fuente: Rojas et al., 2014

Inundaciones provocadas por la acción humana se han registrado desde la región de Antofagasta a la del Biobío, reportándose al menos 10 eventos durante el último siglo, siendo la región del Maule la que concentra el 80% de los eventos a nivel nacional. Este tipo de inundaciones causadas por mal manejo de estructuras hidráulicas, se registran en cualquier época del año; sin embargo en las últimas dos décadas se concentran en el período de primavera a verano (Rojas et al., 2014).

Para el caso del río Rapel, la ocurrencia de inundaciones deriva del paso de sistemas frontales fríos y cálidos, intensificados durante el Fenómeno del Niño hasta el río Cautín (38° Lat. S). Los ríos Tinguiririca y Cachapoal que nacen en Los Andes, son generalmente afectados por sistemas frontales cálidos que provocan inundaciones violentas a causa del ascenso de la isoterma cero, proceso que incrementa el área aportante. En cambio, hacia la costa los sistemas frontales fríos son los que provocan intensas precipitaciones, generando inundaciones con efectos catastróficos casi inmediatos en la población aledaña al río Rapel y esteros Alhué y Las Palmas (Rojas et al., 2014).

Durante crecidas extraordinarias, la zona más afectada es la ribera sur del río Rapel, entrando una fuerte corriente por el sector denominado El Monasterio, en Rapel de Navidad, que activa un antiguo lecho o brazo de río que corta en dos (2) a la localidad. La corriente se va disipando como una inundación por derrame, hacia el sector de Piuchen. En la ribera norte, el río también activa un antiguo canal, pero con un impacto menor en cuanto a superficie y población afectada.

Aguas abajo, la corriente vuelve a ensanchar el cauce varias decenas de metros, afectando viviendas, predios agrícolas, ganado, sitios eriazos, interrupción de vías y caminos rurales, siendo los sectores de La Vega y La Boca los más impactados. El último gran evento del año 2006, en la localidad de Rapel de Navidad dejó 32 viviendas con daño y 128 personas damnificadas, y hacia La Boca y La Vega afectó 20 viviendas y 20 personas damnificadas (ONEMI, 2008).

Considerando la situación descrita, el año 2006 se llevó a cabo la construcción de una defensa fluvial del tipo enrocado que comprende una longitud de 600 m. con una altura total que va desde los 11 m totales (con fundación) hasta los 7 m totales (con fundación) en la medida que se avanza hacia aguas abajo. Además existe un pretil fluvial de 250 metros continuo al enrocado. Considerando que la longitud total hasta el puente Rapel es de 1200 m, podemos decir que existen otros 600 m sin enrocado (DOH, 2015).

Ya en el año 2003 se construyó un pequeño enrocado de aproximadamente 170 m, que en 2006 fue sobrepasado con las consecuencias ya señaladas anteriormente. Por tanto, de acuerdo a

los registro de trazas de inundación existentes a esa fecha, se tomó la determinación de realizar un enrocado que superara las cotas de crecida del 2006, reforzado especialmente en la zona donde se inicia y empalmando al cerro a fin de evitar que el agua exceda la altura e ingrese nuevamente por el sector Monasterio. Esta mismo tipo de reforzamiento de riberas se realizó aguas abajo en los sectores afectados el año 2006 (DOH, 2015).

Debido a estos eventos ocurridos en el pasado y la desactualización de la cartografía de áreas de inundación desde el año 1976, se hace de real importancia identificar cuáles son las áreas de riesgo presentes en estos sectores, permitiendo zonificar y evaluar la implementación de Planes de Protección Civil por parte de ONEMI, buscando prevenir y mitigar la emergencia en las zonas posibles de ser afectadas.

Figura 3: Punto histórico de inicio desborde río Rapel, sector Monasterio, Rapel de Navidad.
Se observa la actual obra de defensa fluvial.



Fuente: Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), 2015.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

- Elaborar el mapa de riesgo de inundación río Rapel producto de eventos hidrometeorológicos extremos vinculados a la cuenca aguas abajo de la Central Rapel.

2.2 Objetivos Específicos

- Analizar los caudales del río para estimar las condiciones iniciales de inundación.
- Estimar el área de inundación ocurrida el año 2006.
- Estimar las zonas de peligro en caso de una crecida del río.
- Estimar las consecuencias de la inundación año 2006.
- Estimar el grado de exposición de la población frente a una crecida del río.
- Analizar el riesgo de las localidades río abajo de la Central Rapel.
- Aproximar recomendaciones al problema de la gestión del riesgo de inundación en el río Rapel.

3. ÁREA DE ESTUDIO

La Comuna de Navidad, se ubica en el extremo Norponiente de la Provincia de Cardenal Caro, Región de O'Higgins, con límites Norte las comunas de Santo Domingo, Región de Valparaíso y comuna de San Pedro, Región Metropolitana; al Sur y el Este, la comuna de Litueche; y Oeste, el Océano Pacífico. Se emplaza en una superficie de 299 km², con una población al año 2002, de 5.422 habitantes, de los cuales el 53, 08 % son varones (2.878) y el 46, 92% son mujeres (2.544) (INE 2002).

Según los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2002, la comuna de Navidad, presenta una densidad promedio de 18 habitantes por Km², valor por debajo del promedio regional cercano a 42 habts/km². La ruralidad cercana al 86,87% ha sufrido una tendencia al decrecimiento poblacional, con una variación negativa de 3.39% (90,26% en 1992 y 86.87% en el año 2002).

No obstante lo anterior, en época estival, la población flotante alcanza las 50.000 personas, generando un incremento considerable en el funcionamiento y disposición de recursos municipales destinados a reglamentar y supervisar las actividades desarrolladas en las riberas de ríos y playas con la consecuente aplicación del Plan de Verano: implementación de salvavidas, control de acceso de buses interprovinciales, supervisores municipales, inspectores, entre otros, el cual reviste en sí mismo la implementación de mecanismos de seguridad y protección ciudadana.

El área de estudio corresponde a la cuenca río abajo de la central Rapel, a unos 15 km de la desembocadura al mar, y comprende las localidades de Rapel de Navidad, Piuchen, Rucatalca, El Bajío, Vega La Boca y La Boca.

4. METODOLOGÍA

Para la elaboración de la cartografía de riesgo por inundación fluvial para la zona aledaña al río Rapel, se analizaron los factores que han podido influir en los desbordes ocurridos en las localidades ribereñas de la comuna de Navidad, además de modelar el perímetro de propagación del último evento ocurrido el 12 de Julio de 2006, utilizando para esto técnicas de Evaluación Multicriterio e integración en Sistemas de Información Geográfica (SIG), vía software ArcGis 10. La modelación describe el área de riesgo y sus potenciales consecuencias, estableciendo umbrales de descarga, factores condicionantes y superficie afectada:

4.1 Aspectos teóricos de la Evaluación Multicriterio (EMC).

Para el fin propuesto, se utilizó la **Teoría del Riesgo** como marco conceptual para analizar la probabilidad de una inundación fluvial de los sectores urbanos y rurales de la comuna de Navidad, cuya causa puede ser de origen natural o antrópica.

El **Riesgo (R)** se define como la probabilidad de que un fenómeno natural o antrópico potencialmente peligroso para la comunidad y susceptible de causar daño a las personas y a sus bienes, ocurra en un lugar y momento determinado (Seco, 1996). Su cuantificación se logra del producto de la probabilidad de que el **Peligro (P)** se materialice con su respectiva **Consecuencia (C)**, que es cuando el fenómeno supera o desborda los umbrales más frecuentes de intensidad, magnitud y localización, transformando el riesgo en peligro con consecuencias negativas para personas y sus bienes.

El grado de afectación de la comunidad ante las consecuencias de un peligro natural o antrópico, depende de su **Exposición (E)** al riesgo, que alude a la población medida en número de habitantes o de bienes por unidad de superficie, situados al interior de una zona de peligro. Las consecuencias de la exposición, se resume en la siguiente ecuación:

$$R = P \times E \times C$$

Donde,

P= Probabilidad de Ocurrencia del Peligro

E= Exposición

C= Consecuencias

Del resultado de esta ecuación, se obtiene el umbral crítico que identifica a un lugar o zona como de menor o mayor riesgo (**R**) frente a la ocurrencia de inundación fluvial.

Importante considerar que para cada factor se establecen los rangos de umbral y ponderaciones que permiten facilitar la valoración en función de su grado de importancia para la ocurrencia del fenómeno de inundación, pues no todas poseen el mismo nivel de importancia. Estos valores umbrales son valorados según recopilación bibliográfica, y a través de consulta a expertos, utilizando la herramienta de “*Evaluación por Pares*” del Método de las Jerarquías Analíticas propuesto por T.L. Saaty (1980).

Finalmente, los resultados del riesgo fueron integrados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). A continuación se describen las principales etapas metodológicas.

4.2 Etapa de Gabinete.

Revisión Bibliográfica: Se consultaron libros y revistas relacionadas con riesgos naturales, estudios morfológicos de ríos, evaluación multi criterio y utilización de SIG en riesgos naturales, y registros históricos de inundaciones, con el fin de determinar las variables que inciden en las inundaciones fluviales para cada factor (peligro, consecuencias y exposición) de acuerdo a las características del área de estudio y a la información disponible.

Luego, se seleccionaron los valores umbrales para cada una de estas variables, logrando crear 3 categorías en cada variable, cada categoría con una valoración numérica, correspondiendo la menor valoración (1) a la con menor incidencia para generar inundaciones, la valoración intermedia a la categoría (2) y la categoría con más valoración (3) es la que posee una mayor incidencia de generación de inundación.

Además a cada categoría se asoció una valoración cualitativa, identificando posibles implicancias de esa categoría en el área de estudio, como si corresponde a una zona inundable, medianamente inundable o poco inundable.

Procesamiento Estadístico: A partir de información entregada por la Central Rapel, se analizaron los caudales anuales evacuados (m^3/s) desde el año 1975 al año 2006 y su tiempo de evacuación en segundos, además de las precipitaciones anuales (mm) correspondientes a la estación localizada en la central.

4.3 Etapa de Terreno.

Área de Inundación: Luego de digitalizar en el software ArcGIS la información levantada por ONEMI en el año 2006 respecto a las áreas que fueron afectadas por la inundación de ese año, se determinó corregir en terreno los límites de esta área, mediante la actividad de búsqueda en las riberas del río Rapel de las trazas del último evento ocurrido, a objeto de encontrar las causas que condicionan la ocurrencia de inundaciones a nivel local.

En la observación de trazas se consideró la vegetación afectada por inundación de eventos anteriores creando fichas de terreno (Anexos) que contemplan el tipo forestal y la densidad de la vegetación. Además se identificaron depósitos fluviales en la caja del río, contemplando el espesor, dirección, rumbo y sorteo de los depósitos, para determinar diferencias entre la zona inundada o la que no se inundó, permitiendo fijar límites de inundación.

También se realizaron análisis hidromorfológicos que permitieron discriminar en los depósitos la competencia y eficiencia del río como agente erosivo (Folk, 1974). El análisis se obtuvo comparando la granulometría de los sedimentos, principalmente tamaño, selección, grado de desgaste y estado de superficie de los clastos o piedras. Para el tamaño, se utilizó la clasificación de Folk (1974), y los estados de forma reconocidos con sus respectivos grados de desgaste fueron:

- Clastos angulosos, indicadores de ausencia o bien corto y violento transporte.
- Clastos subangulosos, muestran un efecto de desgaste.
- Clastos redondeados, indicadores de un transporte continuo donde el desgaste de acentúa.
- Clastos redondos: es aún mayor el desgaste.
- Clastos ovoides, indicadores del máximo desgaste.

Se reconoció también los clastos en función de su estado de superficie:

- Brillo Natural, donde el transporte es prácticamente nulo y se da una meteorización in situ.
- Brillante, hay un pulido del clasto por transporte, pero por un medio acuático.
- Mate, identifica acción eólica.

Complementando, se realizó un análisis de la tendencia evolutiva del borde de río, comparando puntos fijos de referencia en fotografías satelitales de diferentes años.

Entrevistas: Para identificar los años de las inundaciones anteriores, debido a muy escasa información disponible, se realizaron entrevistas a pobladores de las localidades que vivieron

eventos anteriores, permitiendo aproximadamente delimitar hasta donde avanzó el agua en las localidades, marcando los puntos con GPS (Ver Anexo Ficha de Entrevistas).

Se realizaron un total de 11 entrevistas a lugareños de las localidades de La Boca, La Vega de la Boca, Piuchen, Rucatalca y Rapel de Navidad. Se abordaron 6 temáticas que correspondieron a:

- Antecedentes y referencias de inundaciones anteriores;
- Percepción de Exposición a las inundaciones;
- Origen de los flujos de agua;
- Comparación de riesgos naturales entre terremotos, tsunamis e inundaciones;
- Prevención, mitigación y resiliencia; y
- Rehabilitación y recuperación de daños

4.4 Procesamiento Cartográfico.

La creación y obtención de coberturas cartográficas se dividieron en los factores que integran al riesgo, según lo mencionado anteriormente y las variables que constituyen los factores según la revisión bibliográfica.

Factor 1. Peligro de Inundación.

Variables:

- a) **Pendiente del terreno:** El primero paso fue procesar un modelo de terreno Aster Global DEM de resolución 1 segundo de arco (30 m) con fecha 17 de octubre 2001, descargado del sitio web Earth Explorer del USGS, el cual permitió extraer las altitudes y pendientes que representan la superficie del área de estudio. Esta variable considera que la probabilidad de inundación será mayor mientras más cercano se esté al río, ya que estas zonas poseen una menor pendiente que las zonas interiores. Se clasificó en 2 categorías, considerando como valor umbral 2% de pendiente, de acuerdo a Bosque et al. (2005). Luego a cada categoría se le entregó un valor de 1 y 3, otorgando el mayor valor a las pendientes menores al valor umbral, debido a la mayor probabilidad de ocurrencia de inundación en esta categoría.
- b) **Altura del terreno:** Mediante una clasificación del modelo digital de elevación ASTER GLOBAL DEM se extraen las altitudes de las áreas ribereñas y se determinan los valores umbrales que corresponden a los 15 y 25 metros sobre el nivel del mar (msnm), de acuerdo a las alturas mínimas y máximas del área de inundación de eventos anteriores encontrados en terreno, y el análisis de 23 perfiles transversales del río desde la desembocadura a la localidad de Rapel de Navidad, en los cuales se identificó que la

altura promedio de la llanura de inundación es 15 msnm. Se otorga el valor más alto (3) a las zonas más altas y el valor mínimo a los terrenos bajos (1).

- c) **Acumulación del flujo de agua:** mediante la herramienta Hidrología de ArcGis, al modelo de terreno Aster Global DEM se le extrajeron las áreas que presentan mayor probabilidad de acumulación del flujo de agua, lograda en función de la depresión del terreno y densidad de drenaje presente. Para esto inicialmente se crearon las variables acumulación y dirección del flujo, que luego fueron integradas en porcentajes de 35% y 65%, respectivamente, y cuyo resultado se clasificó en 3 categorías, siendo las categorías con más incidencia de inundación las que poseen el valor máximo (3) y las con menor incidencia el valor mínimo (1).
- d) **Litología:** De acuerdo a la permeabilidad se clasificaron los depósitos de roca, obtenido a partir de la Carta Geológica 1:1.000.000 de SERNAGEOMIN. Se considera en esta variable, si un territorio desde el punto de vista geológico es propicio para que se produzcan inundaciones o no, pues donde se encuentren rocas impermeables será más lenta la infiltración y por tanto mayor contenido de agua quedará depositada sobre la superficie. El valor umbral corresponde al tipo de sedimento que predomina en los depósitos de roca (Seco, 1996), en este caso arenas medias a gruesas y arenas finas. El valor que se asocia a las dos categorías creadas depende de la permeabilidad de los sedimentos siendo más alta en las arenas medias a gruesas, por lo que obtiene el valor mínimo (1) y un valor intermedio (2) a las arenas finas.
- e) **Usos de Suelo:** De acuerdo al Catastro de Bosque Nativo de Conaf (2013), se obtienen las tipologías de usos del suelo en el territorio, y dependiendo de estos usos se puede establecer la protección del terreno a la erosión provocada por el escurrimiento, y la infiltración que actúa como una barrera natural que regula la cantidad de agua que llegará de forma efectiva al suelo. Se crearon 3 categorías según siendo el valor umbral el tipo de densidad de la vegetación (Ollero, 1997), con mayor valor (3) corresponde a áreas desprovistas de vegetación siendo las con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de inundación, con valor 2, la categoría de vegetación semi-densa y con valor 1, vegetación densa.
- f) **Deposición Aluvial:** Se obtuvo del procesamiento de una imagen Landsat 8 OLI TIRS con resolución 30 m y fecha 3 de enero del año 2015, descargado del sitio web Earth Explorer del USGS. Como primer paso, se trabajó con las bandas espectrales en combinación B752 para discriminar las unidades geológicas principales; combinación bandas B654 para discriminar las superficies de suelo y agua, y; combinación bandas B546 para discriminar los suelos con mayor presencia de humedad (Araújo et al., 2009). En cada combinación de bandas se realizó el método de clasificación no supervisada, a objeto de identificar las zonas que presentan tipos de suelo o vegetación similares en reflectancia a los actuales bancos naturales presentes en el río, evidencia que permite

estimar la antigua acción del río y por ende, de pasadas inundaciones (Araújo et al., 2009). Finalmente, se suman las combinaciones B654 y B546 y su resultado se divide por la combinación B752, para obtener las diferencias espaciales de áreas de mayor depositación o carga aluvial (Butler, 2013). Se consideran 3 categorías, mediante una reclasificación, con valores según la probabilidad de inundación que poseen, correspondiendo los valores altos (3) las que poseen una alta carga aluvial, valores intermedios (2) moderada carga aluvial y valores mínimo (1) con baja carga.

Factor 2. Consecuencias por Inundación.

Variables:

- a) Superficie total afectada por inundación año 2006.
- b) Viviendas afectadas por inundación año 2006: según número de viviendas dañadas.
- c) Predios agrícolas afectados por inundación año 2006: según superficie en hectáreas que fueron afectadas.
- d) Caminos afectados por inundación año 2006: según número de caminos interrumpidos y la jerarquía de estos.
- e) Damnificados por inundación año 2006: según el número de damnificados.

La magnitud de las consecuencias se evaluó según la recurrencia de afectación histórica de los sectores involucrados, siendo utilizados los datos de la inundación ocurrida el 12 de julio del año 2006, información disponible en la institución en el Diagnóstico Zonas Vulnerables por Crecidos de Embalses (ONEMI, 2008). Se consideraron datos de la superficie inundada, personas damnificadas, viviendas, caminos y predios agrícolas afectados. Los valores finales se representaron en porcentajes respecto a la totalidad de habitantes, viviendas y predios de las localidades.

Factor 3. Exposición a la Inundación.

Variables:

- a) Habitantes totales por localidad: en base al Censo 2005, Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos (INE, 2005).
- b) N° Viviendas totales por localidad: en base al Censo 2005, Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos (INE, 2005).
- c) Superficie total por usos de suelo: Dependiendo de su uso es su nivel de exposición a las inundaciones, información procesada a partir del Catastro de Bosque Nativo de Conaf (2013).

Este factor permitió estimar número de personas expuestas según localización, y diferenciar aquellas localidades que poseen de acuerdo a su población total, superficie y uso de suelo, mayor

o menor exposición a las inundaciones. Luego se crearon cartografías diferenciando sectores de alta, media y baja exposición. Obteniendo la exposición final por una sumatoria lineal ponderada.

4.5 Evaluación Multicriterio.

Para cada uno de los 3 factores considerados, se definieron valores umbrales y asignaron ponderaciones, según grado de importancia en la ocurrencia del fenómeno. La ponderación se logró a partir de la consulta de expertos de ONEMI (2) y la Pontificia Universidad Católica de Chile (2), de quienes cuya visión y percepción se ponderó utilizando el Método de Evaluación por Pares dentro del contexto del Método de las Jerarquías Analíticas propuesto por T.L. Saaty (1980). Finalmente, se integran los factores vía SIG mediante una sumatoria lineal ponderada.

4.5.1 Ponderación y Suma de Variables:

Uno de los puntos centrales al momento de hacer un análisis que involucre distintas variables está el considerar que no todas las variables poseen el mismo nivel de importancia. Siguiendo dicha lógica es que los datos fueron ponderados de acuerdo a lo que Gómez y Barredo (2005) plantean en la Evaluación Multi-Criterio. Dentro de diversos métodos fue elegido el “Método de Evaluación por Pares”, dentro del contexto del Método de las Jerarquías Analíticas propuesto por T.L. Saaty (1980; p. 72). Lo primero a realizar fue crear una matriz de celdas, donde fueron ubicadas las variables tanto en columnas como filas. Al quedar las variables unas frente a otras fue posible comparar la importancia de una sobre las demás a través de juicios de valor (a_{ij}), que a su vez se basa en la escala de tipo continuo de Saaty, que jerarquiza valores desde el 1/9 al 9, tal como lo indica la Figura 2 .

Figura 4: Escala de Valores de Saaty.

$1/9$	$1/7$	$1/5$	$1/3$	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte	Moderada	Igual	Moderada	Fuerte	Extrema		

Fuente: Saaty, 1980.

Una vez indicados los valores (a_{ij}) en la matriz de comparación según la escala de valores de Saaty, se obtuvo la matriz indicada en la Tabla 2. Cabe destacar, que los valores (a_{ij}) presentados fueron asignados por 5 participantes.

Tabla 2: Matriz comparación por pares factor Peligro.

PELIGRO	Pendiente	Altitud	Litología	Depositación	Usos de suelo	Dirección de acumulación
Pendiente	1	3	5	3	5	3
Altitud	1/3	1	3	1/3	3	1/3
Litología	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1/5
Terrazas	1/3	3	3	1	5	1/3
Usos de suelo	1/5	1/3	3	1/5	1	5
Dirección de acumulación	1/3	3	5	3	1/5	1

Una vez completada la tabla se procedió a calcular el eigenvector principal de la matriz, es decir, se creó un orden de prioridad de los factores o variables. De acuerdo a Bosque et al. (2005): *“el procedimiento más usual consiste en primer lugar en obtener los valores de la matriz de comparación normalizados por columnas. Así el valor normalizado para cada celda se obtiene a partir del cociente entre cada valor (aij) y el valor de la sumatoria de cada columna, posteriormente los valores normalizados se suman por filas obteniendo así el eigenvector principal, el cual se normaliza, dividiendo cada uno de los valores de dicho vector ente n (número de factores), obteniendo de esta manera el eigenvetor principal normalizado que representa los pesos (w j) de cada factor”* (p. 74).

Tabla 3: Ponderación variables factor Peligro.

Variable	Ponderación
Pendiente	15,60%
Altura	7,60%
Litología	12,30%
Usos de Suelo	20,20%
Acumulación de Flujos	19,10%
Depositación Aluvial	15,60%

Además, se calculó la razón de consistencia para la ponderación, que es un índice que permite verificar que los valores obtenidos de la matriz - a partir de los juicios de valor aplicados - están dentro de los rangos aceptables. Ello permitió reducir la incertidumbre que genera el asignar valores de forma manual que pudiesen estar sujetos a subjetividades. Este índice establece que igual o sobre el umbral de 0,10 es un resultado inaceptable y por tanto son revisados los juicios de valor (aij). Bajo 0,10 se consideran satisfactorios los juicios de valor. Para el cálculo debe se aplicó la fórmula de:

Dónde:

$$\text{Razón de consistencia} = \frac{\text{Índice de consistencia}}{\text{Índice aleatorio}}$$

$$\text{Índice de consistencia} = \frac{(\lambda \text{ máx} - n)}{(n-1)}$$

$\lambda \text{ máx} = \text{eigenvector máximo}$

$n = \text{número de variables en la matriz}$

El índice aleatorio se refiere a un índice de consistencia de una matriz generada aleatoriamente a partir de una escala de 1 a 9, con juicios de valor recíprocos y diagonal = 1. Para los juicios de valor de dicha matriz se consideró supuestos teóricos perfectos, es decir, los factores poseen relaciones exactas. Así, es posible obtener valor el índice aleatorio desde la tabla presentada a continuación.

Figura 5: Valores para índices aleatorios.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R n	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fuente: Saaty, 1980.

Al ingresar los datos en la fórmula de la Razón de Consistencia dio como resultado un valor de 0,049, lo que es satisfactorio.

Finalmente, se realizó una suma lineal ponderada en el software ArcGIS, a través de la herramienta “Suma Ponderada”, considerando las ponderaciones de cada variable, obteniendo de esta forma la probabilidad de ocurrencia o peligro de inundación, representada en la siguiente fórmula:

$$\text{Peligro} = (\text{Pendiente} * 0.25) + (\text{Altura} * 0.16) + (\text{Litología} * 0.08) + (\text{Usos Suelo} * 0.12) + (\text{Acumulación} * 0.2) + (\text{Depositación} * 0.19)$$

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de caudales para estimar las condiciones iniciales de inundación.

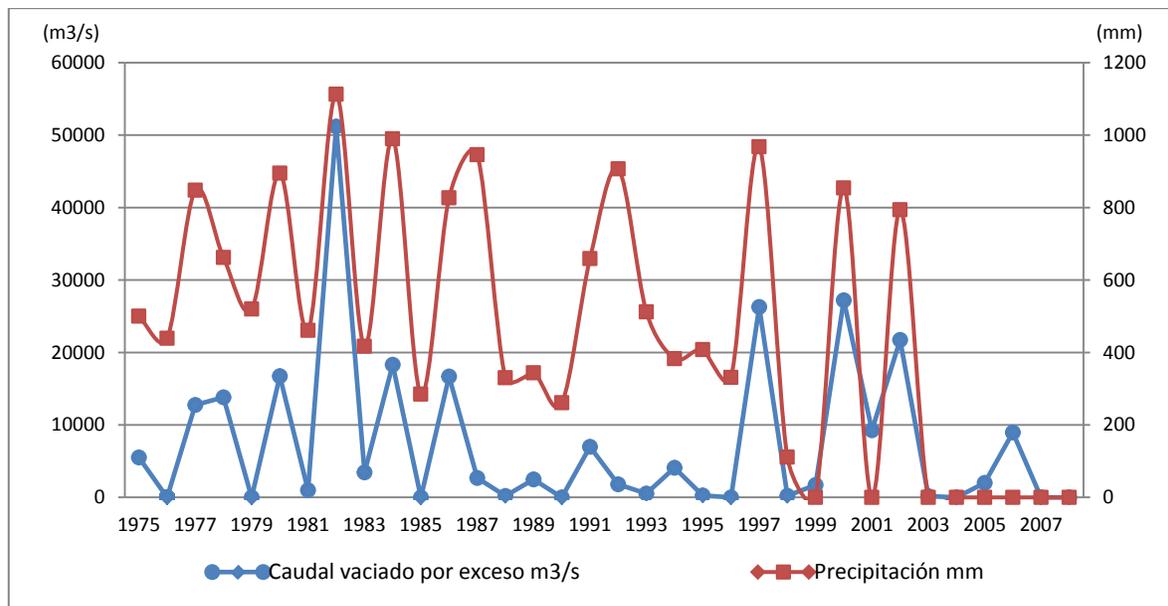
Como resultado del análisis de la información estadística entregada por la Central Rapel, se obtiene una relación directa entre los máximos y mínimos caudales anuales vaciados (Q_s) y las precipitaciones (Pp) anuales mínimas y máximas. El umbral detectado corresponde a evacuaciones anuales en torno a $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y precipitaciones aproximadas de 500 mm . A continuación se entrega la siguiente relación:

Tabla 4: Años con relación directa umbral de caudal y precipitación.

<i>Años $Q_s > 8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Pp > 500 \text{ mm}$.</i>	<i>Años $Q_s < 8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Pp < 500 \text{ mm}$.</i>
1976, 1979, 1981, 1983, 1985, 1988, 1989, 1991, 1993, 1994, 1995, 1998 y 1999	1977, 1978, 1980, 1982, 1984, 1986, 1987, 1992, 1997, 2000, 2001, 2002, 2005 y 2006

El máximo umbral registrado fue el año 1982 con $51.193 \text{ m}^3/\text{s}$ vaciados y 1.113 mm de precipitación anual, año que como veremos más adelante corresponde a un evento del Fenómeno del Niño. Por otra parte, el año 1998 fue el que menos llovió con 111 mm/año , aunque igualmente se evacuaron $225 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que se explica posiblemente por decisiones de operación misma de la Central. A continuación se muestran los gráficos de las variables consideradas:

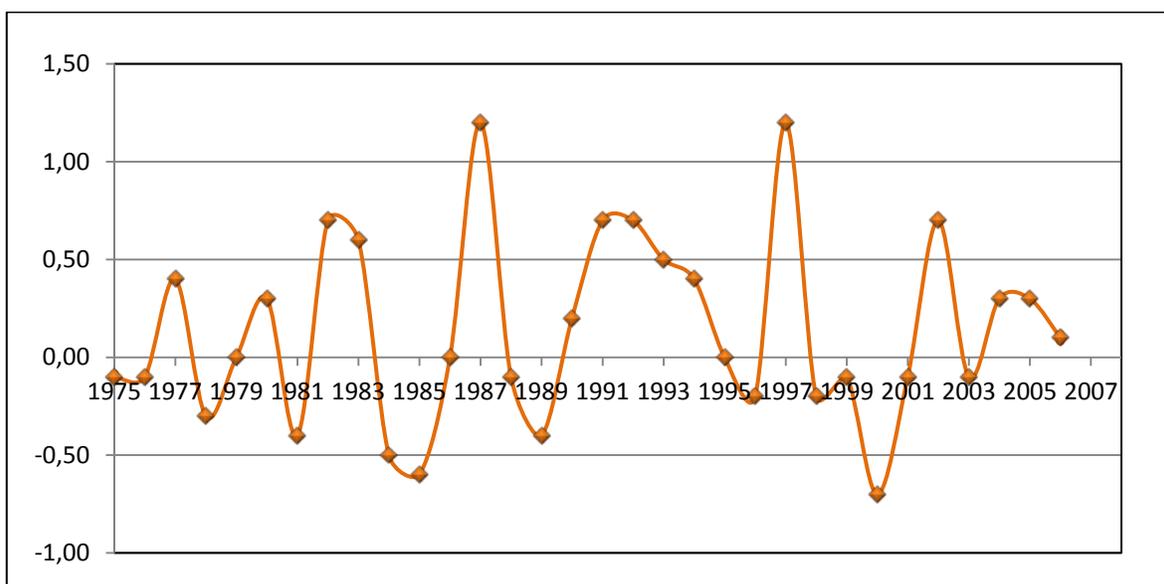
Gráfico 1: Relación caudal evacuado versus precipitación cuenca baja Rapel.



Fuente: ENDESA, 2014.

De esta misma forma, se complementa esta relación integrando los valores del fenómeno oceánico atmosférico ENOS (National Weather Service, 2014) estableciendo máximos en la oscilación térmica con valores mayores a 0.5 (fenómeno del niño), implicando mayores temperaturas y mayores precipitaciones, y mínimos con valores negativos en la oscilación térmica (fenómeno de la niña) con menores temperaturas y precipitaciones. Vinculando de esta forma, las máximas precipitaciones y máximas evacuaciones ocurridas los años 1982, 1983, 1987, 1997 y 2002 al Fenómeno del Niño.

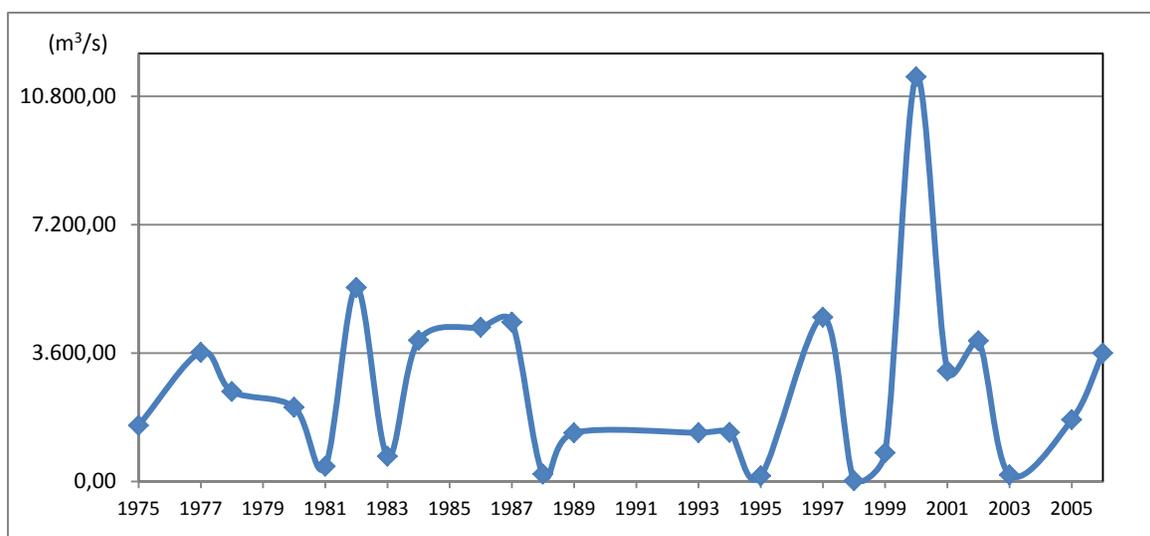
Gráfico 2: Influencia Fenómeno del Niño o ENOS.



Fuente: National Weather Service, 2014.

El siguiente paso fue la extracción de la base de datos el máximo caudal evacuado (m^3/s) en un periodo de 24 horas para cada año, con su respectivo tiempo de evacuación en segundos. Para relacionar estas dos variables, se aplicó una división entre ellas que permite obtener una proporción entre el máximo caudal evacuado en m^3/s y el tiempo en segundos en que este caudal fue evacuado.

Gráfico 3: Máximo caudal (m³/s) evacuado en 1 día.



Fuente: ENDESA, 2014.

Los resultados de esta proporción otorgaron valores que fluctúan entre 0,0005 y 0,0133, interpretándose los valores más bajos como proporciones óptimas entre el caudal evacuado y su tiempo de evacuación, ya que los valores del tiempo en la proporción son mayores. Los valores altos, estableciendo como valor umbral 0,008, corresponden a proporciones que poseen valores de tiempo menores por lo que la proporción no se encuentra equilibrada. Para 12 años esta proporción tiene valores superiores a 0,008 (1982, 1984, 1986, 1987, 1989, 1994, 1997, 2001, 2002, 2003, 2005 y 2006), pero no todos los caudales de estos años son significativos para generar desbordes río abajo, por lo que se determinó un valor umbral de 3.600 m³/s como caudal evacuado, correspondiendo al valor de caudal evacuado del año 2006 siendo el último año y con el menor caudal evacuado registrado en el que se generaron desbordes del río Rapel.

Al contemplar los dos valores umbrales estipulados, existen años que sobrepasan sus valores (1982, 1984, 1986, 1987, 1997, 2002 y 2006), correspondiendo a años en los que se generaron desbordes del río Rapel coincidiendo con los registros recopilados en terreno mediante entrevistas aplicadas a la población de las localidades afectadas y por registros históricos entregados por la Dirección de Planeamiento del MOP (DIRPLAN, 2012).

En la tabla siguiente se muestran los datos analizados de caudal y precipitación, valores de las oscilaciones del fenómeno ENOS (valores en rojo corresponden al Fenómeno del Niño) y los años resultantes que superan los valores umbrales establecidos.

5.2 Estimación del área de inundación año 2006.

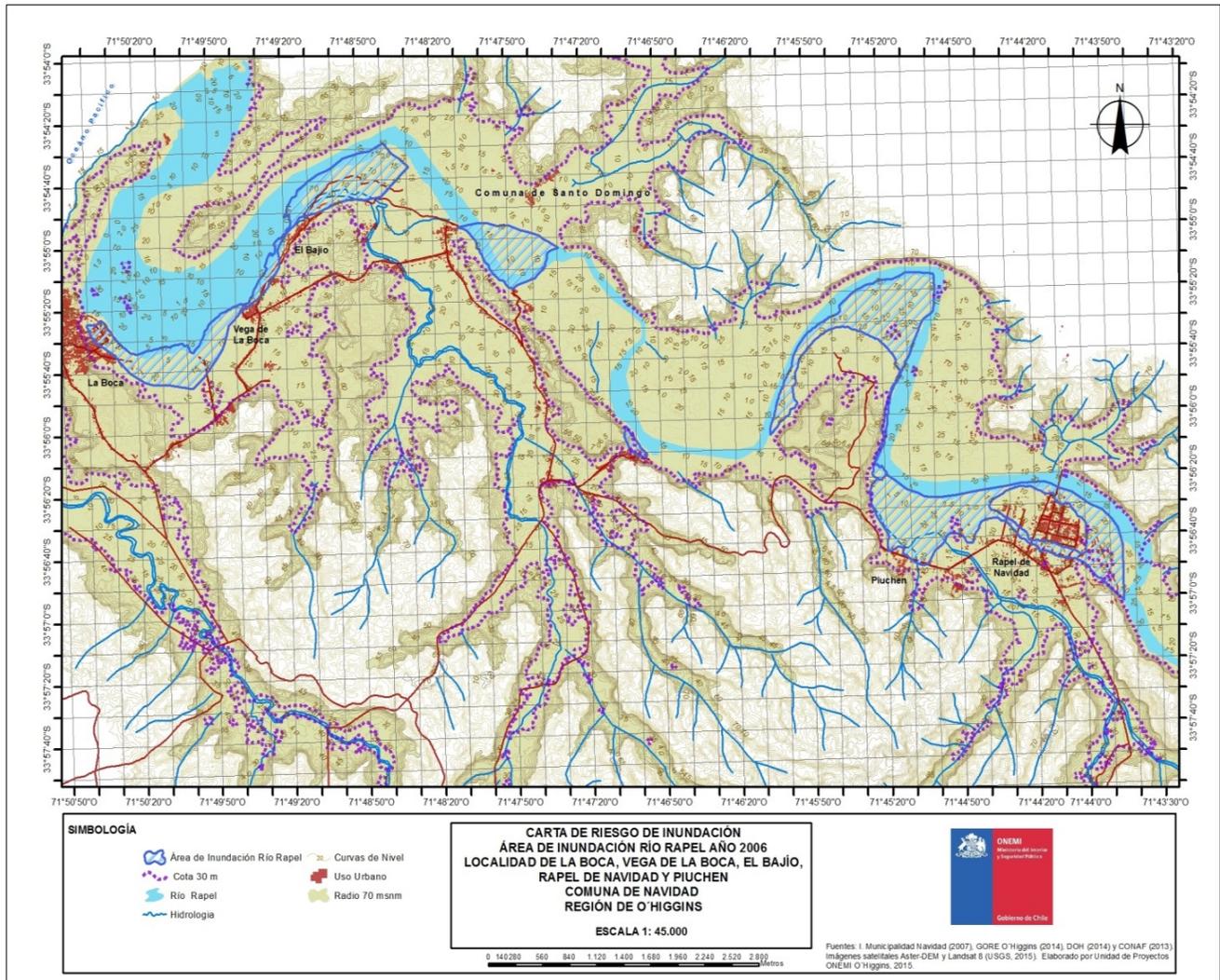
Primero, se georreferenciaron una totalidad de 59 puntos dados en terreno e ingresados al SIG con los que se corrigieron el perímetro de inundación para el año 2006 del río Rapel, como muestra en la Carta N° 1. Luego, este resultado fue contrastado con las 11 entrevistas realizadas en el área de estudio.

Los entrevistados al ser consultados sobre antecedentes y/o referencias de inundaciones anteriores, recuerdan claramente la última inundación del año 2006, así como en menor medida las inundaciones de los años 1982, 1984, 1986, 1987 y 1997. Se indica que la de mayor intensidad y afectación fue la inundación del año 1982. Y se menciona además una inundación del año 1924, que no se tiene mucha certeza pero que fue devastadora e incluso con fallecidos.

En la temática de exposición actual a las inundaciones, existe una percepción actual de estar expuestos a las inundaciones, pero parcialmente disminuido producto de las nuevas obras de mitigación y a las bajas precipitaciones de los últimos años. Respecto a la percepción de la Central Rapel, establecen una asociación entre las inundaciones y un mal manejo de la Central de sus vaciamientos, unido a una falta de comunicación y ayuda por parte de ésta en momentos de crisis. De esta misma forma, existe temor en los entrevistados por la existencia de una fisura en la Central que pueda generar rompimiento del muro, debido a un terremoto de gran magnitud.

Finalmente, los entrevistados señalan que al comparar riesgos naturales, indican que existe un mayor temor a las inundaciones que a los terremotos o tsunamis. Esto se atribuye a la falta de aviso y a la rapidez del fenómeno. Además existe una vinculación de los terremotos con la Central Rapel.

Carta 1: Área de inundación julio 2006.



5.3 Estimación de las zonas de peligro en caso de una crecida del río (P).

5.3.1 Variables y Riesgo:

Tabla 5: Pendiente.

Pendiente (%)	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Menor a 2%	Pendiente muy leve	Mayor probabilidad de inundación	3
Mayor a 2%	Pendiente moderada a abrupta	Menor probabilidad de inundación	1

Tabla 6: Altura.

Altura (m.s.n.m)	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Menor a 15 m	Baja altura	Zona inundable	3
15 a 25 m	Moderada altura	Zona Medianamente inundable	2
Mayor a 25 m	Alta altura	Zona Poco Inundable	1

Tabla 7: Litología.

Litología	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Arenas medias a gruesa	Permeabilidad muy alta	Baja probabilidad de inundación	1
Arenas finas	Permeabilidad moderada	Moderada probabilidad de inundación	2

Tabla 8: Usos de Suelo.

Usos de Suelo	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Uso Río, Playas y Dunas	Áreas desprovistas de vegetación o baja densidad	Alta probabilidad de inundación	3
Pradera, terrenos agrícolas	Áreas con vegetación semi-densa	Moderada probabilidad de inundación	2
Bosque, matorral	Áreas con vegetación densa	Baja probabilidad de inundación	1

Tabla 9: Acumulación del Flujo.

Acumulación de la dirección del flujo	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Alta Acumulación de la dirección del flujo	Zonas de alta densidad de drenaje	Alta probabilidad de inundación	3
Moderada Acumulación de la dirección del flujo	Zonas de moderada densidad de drenaje	Moderada probabilidad de inundación	2
Baja Acumulación de la dirección del flujo	Zonas de baja densidad de drenaje	Baja probabilidad de inundación	1

Tabla 10: Áreas Depositación Aluvial.

Áreas de depositación aluvial	Características	Implicancia	Valor Riesgo
Baja carga aluvial	Predomina en llanuras estabilizadas	Baja probabilidad de inundación	1
Moderada carga aluvial	Predominan en llanuras fluvio aluviales	Moderada probabilidad de inundación	2
Alta carga aluvial	Predominan en la llanura de inundación	Alta probabilidad de inundación	3

5.4 Estimación de las consecuencias de la inundación año 2006. (C)

5.4.1 Variables y Riesgo:

Tabla 11: Damnificados, Viviendas, Predios, Caminos y Superficie Afectada.

Localidad	Damnificados	Valor	Viviendas Afectadas	Valor	Predios Afectados (km ²)	Valor	Caminos Afectados	Valor	Superficie Afectada (km ²)	Valor Riesgo
La Boca	20	1	20	1	0.2511199	3	1 camino principal	2	0.315928	3
La Vega	12	3	5	2	0.0287402	3	1 camino principal	2	0.033638	1
El Bajío	8	3	2	2	0.0073134	3	Camino menor	1	0.014605	1
Rapel	128	3	32	3	0.540435	3	2 caminos principales	3	0.686371	3
Piuchen	32	3	8	3	0.117278	3	2 caminos principales	3	0.123394	2
Rucatalca					0.0612	2				

5.5 Estimación grado exposición de la población frente a una crecida del río. (E)

5.5.1 Variables y Riesgo:

Tabla 12: Habitantes y Viviendas Totales.

Localidad	Habitantes Total	Valor	Viviendas Total	Valor Riesgo
La Boca	490	3	649	3
La Vega	70	2	20	2
El Bajío	33	2	15	2
Rapel	614	3	248	3
Piuchen	109	2	53	2

Tabla 13: Superficie por Usos de Suelo.

Categoría	Característica	Implicancia	Valor Riesgo
Forestal	Presencia de protección natural	Baja probabilidad de inundación	1
Terrenos agrícolas	Moderada protección natural	Moderada probabilidad de inundación	2
Urbano/Río	Baja o sin protección natural	Alta probabilidad de inundación	3

5.6 Ponderación y Razón de Consistencia.

Se muestra a continuación los resultados de las matrices de comparación por pares para cada factor, su razón de consistencia y la ponderación final de cada una de ellos.

5.6.1 Peligro (P):

Tabla 14: Matriz comparación de variables Peligro.

PELIGRO	Pendiente	Altitud	Litología	Depositación	Usos de Suelo	Acumulación del Flujo
Pendiente	1	3	5	3	5	3
Altitud	1/3	1	3	1/3	3	1/3
Litología	1/5	1/3	1	1/3	1/3	1/5
Terrazas	1/3	3	3	1	5	1/3
Usos de suelo	1/5	1/3	3	1/5	1	5
Dirección de acumulación	1/3	3	5	3	1/5	1

Tabla 15: Ponderación variables Peligro.

Variable	Ponderación
Pendiente	15,60%
Altura	7,60%
Litología	12,30%
Usos de Suelo	20,20%
Acumulación de Flujos	19,10%
Depositación Aluvial	15,60%

Al ingresar los datos en la fórmula de la Razón de Consistencia dio como resultado un valor de 0,049, lo que es satisfactorio.

5.6.2 Consecuencias (C):

Tabla 16: Matriz comparación de variables Consecuencias.

CONSECUENCIAS	Damnificados	Número de viviendas afectadas	Número y jerarquía de caminos cortados	Superficie afectada de predios agrícolas	Superficie afectada total
Damnificados	1	1	5	3	1/3
Número de viviendas afectadas	1	1	5	3	1/3
Número y jerarquía de caminos cortados	1/5	1/5	1	1/5	1/7
Superficie afectada de predios agrícolas	1/3	1/3	5	1	1/3
Superficie afectada total	3	3	7	3	1

Tabla 17: Ponderación variables Consecuencias.

Variable	Ponderación
Superficie Afectada	39,90%
Damnificados	20,20%
Viviendas Afectadas	20,20%
Caminos Interrumpidos	4,90%
Predios Afectados	14,80%

De la matriz se obtienen las ponderaciones correspondientes a cada variable con una razón de consistencia del 0,061 considerándose aceptable.

5.6.3 Exposición (E):

La ponderación se realizó en 3 partes iguales, otorgándoles al mismo porcentaje a cada variable (33,33%) debido a que por los expertos consultados las variables tienen pesos similares, creando una matriz de valores neutros (1).

Tabla 18: Ponderación variables Exposición.

Variable	Ponderación
Habitantes Totales	33,33%
Viviendas Totales	33,33%
Uso de Suelo	33,33%

5.7 Categorías y Cartografías.

Se crearon 3 categorías en base a los resultados obtenidos, considerando los valores de cada una de las variables.

Tabla 19: Categorías Propuestas.

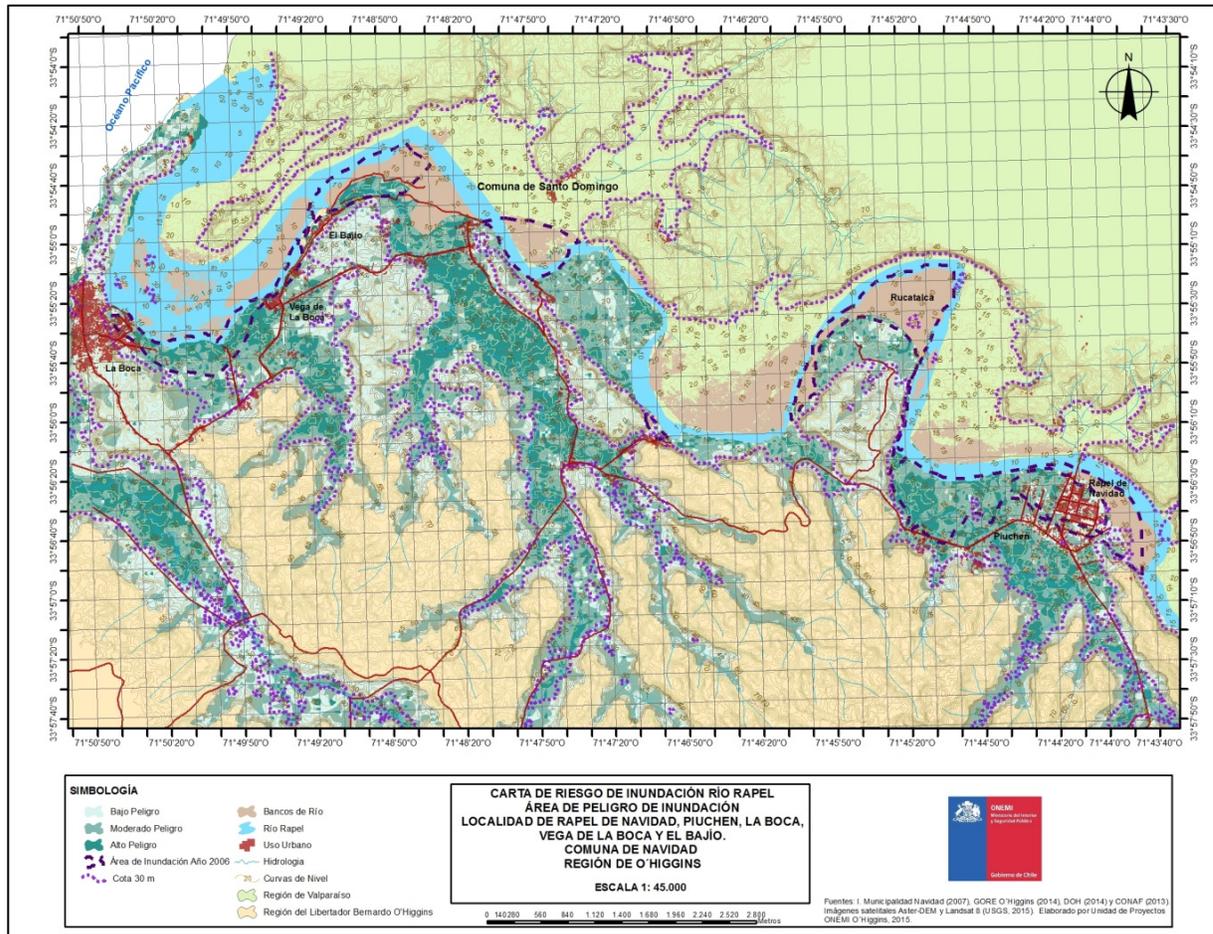
Valor Riesgo	Categoría
1	Bajo Peligro, Consecuencias Menores y Baja Exposición
2	Moderado Peligro, Consecuencias Moderadas y Exposición Moderada
3	Alto Peligro, Consecuencias Mayores y Alta Exposición

Peligro:

- 1) Bajo Peligro: Corresponden a zonas de alta pendiente y altitud, conformadas por rocas de alta permeabilidad y con baja acumulación de flujos de agua, por lo que poseen baja carga aluvial y se dan preferentemente en suelos con uso de bosques y matorrales.
- 2) Moderado Peligro: Se identifica como zonas de baja pendiente y moderada altitud, con rocas de baja permeabilidad y moderada acumulación de flujos de agua, por lo que poseen una carga aluvial moderada, se dan preferentemente en suelos con uso agrícola y praderas.

- 3) Alto Peligro: Localizado en áreas de baja pendiente y baja altitud, conformada por rocas de baja permeabilidad y alta acumulación de flujos de agua, por lo que poseen una carga aluvial alta, se dan preferentemente en suelos con uso urbano y asociados al uso fluvial.

Carta 2: Peligro de Inundación.

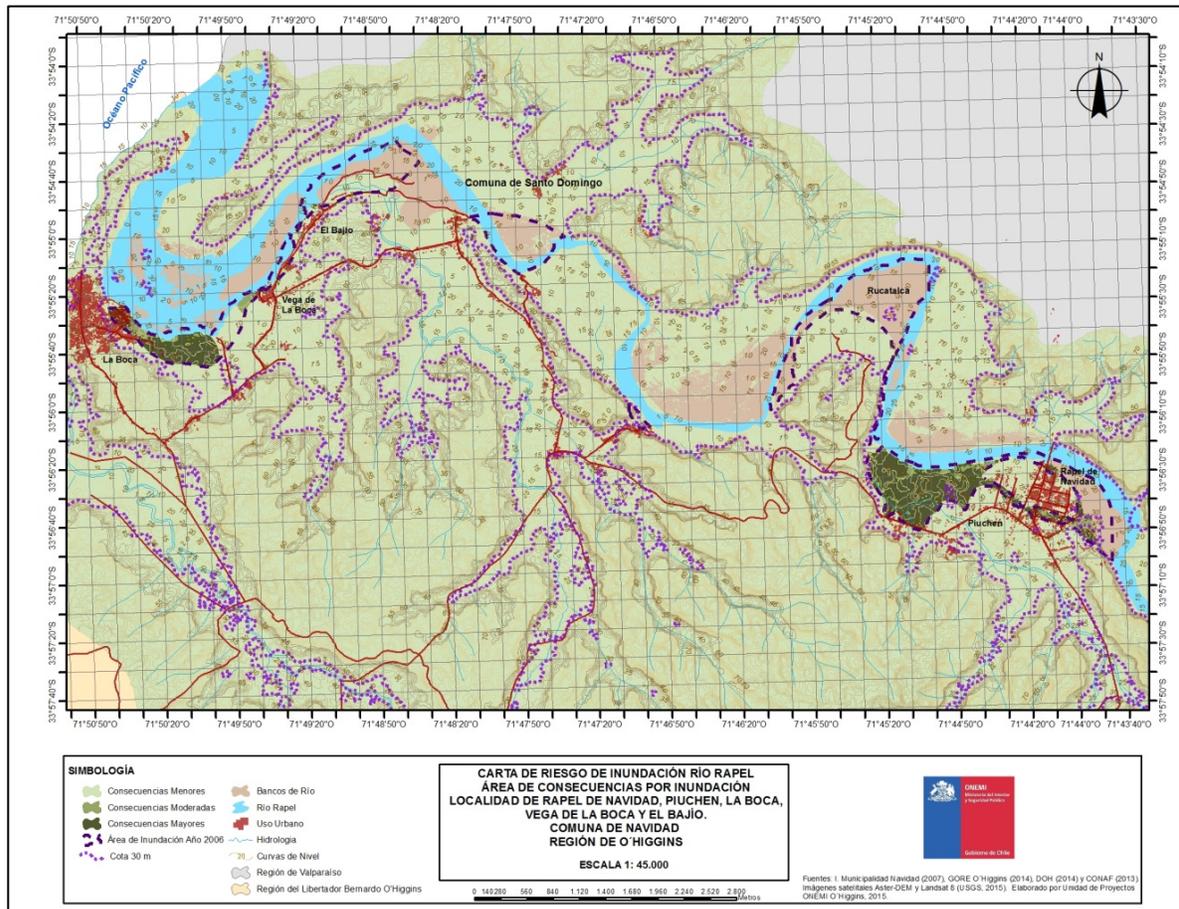


Consecuencias:

- 1) Consecuencias Menores: Corresponde a áreas con afectaciones menores al 5% en viviendas, damnificados y predios agrícolas. Además de poseer una superficie afectada total menor a 10 hectáreas y sin interrupción de caminos principales.
- 2) Consecuencias Moderadas: Localizadas en áreas con afectación de personas, viviendas y predios agrícolas entre el 5 y el 10% de la totalidad, con un camino principal afectado y superficie total inundada entre 10 y 50 hectáreas.

- 3) Consecuencias Mayores: Se concentran en las localidades que poseen una superficie total inundada mayor a 50 hectáreas y con porcentajes mayores al 10% respecto al total en personas, viviendas y predios afectados, con más de un camino principal interrumpido.

Carta 3: Consecuencias por Inundación.

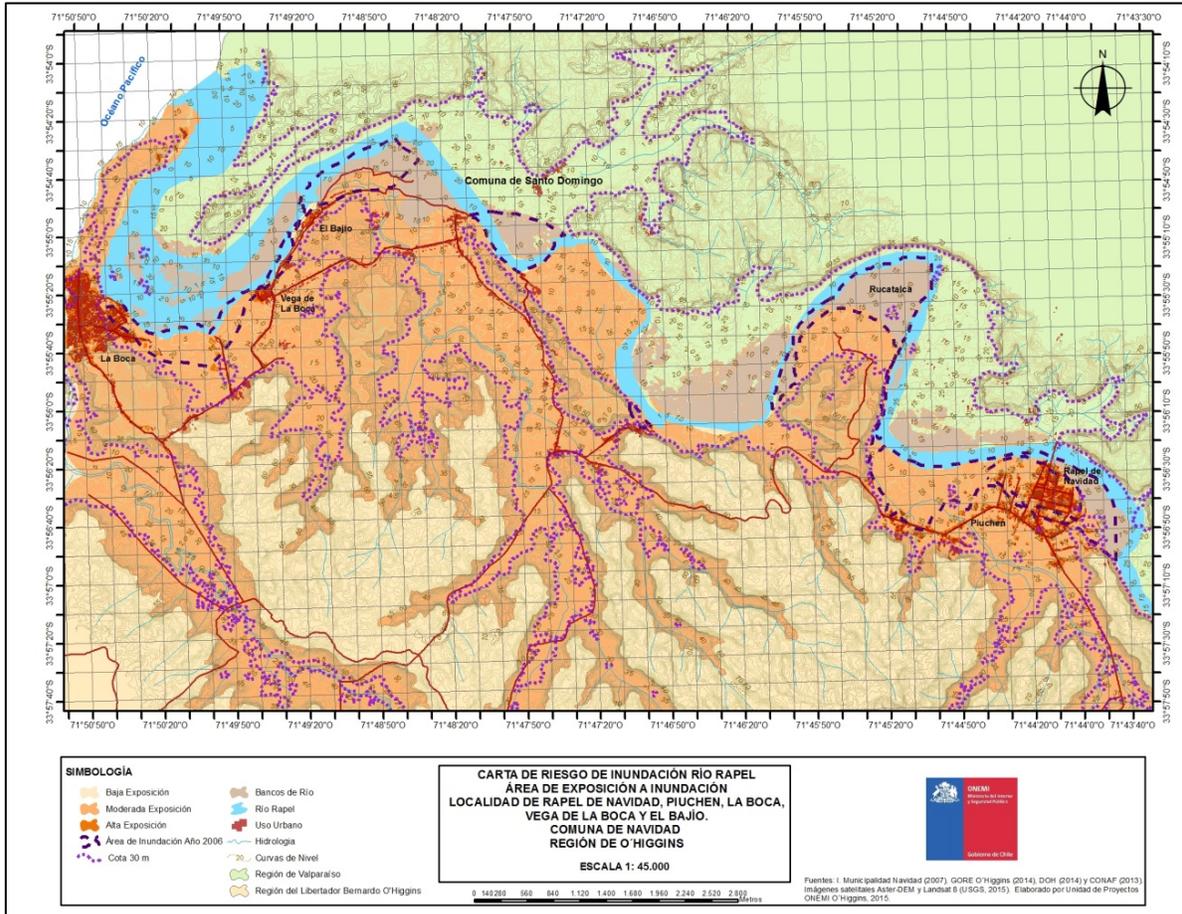


Exposición:

- 1) Baja Exposición: Se localiza en áreas que poseen menos de 30 habitantes totales y 10 viviendas totales con usos de suelo tipo forestal.
- 2) Moderada Exposición: Corresponde a zonas que poseen entre 30 y 100 habitantes totales y con 10 a 50 viviendas totales y que posee terrenos agrícolas como categoría de uso de suelo.

- 3) Alta Exposición: Corresponde a áreas con un número mayor a 100 habitantes totales y más de 50 viviendas totales, además tiene uso de suelo urbano o asociado a actividad fluvial.

Carta 4: Exposición a Inundación.



Riesgo:

Luego de la integración de los factores Peligro, Consecuencias y Exposición, se relacionaron los valores de cada uno para crear 3 categorías finales de Riesgo de Inundación Río Rapel.

Tabla 20: Categorías Finales de Riesgo.

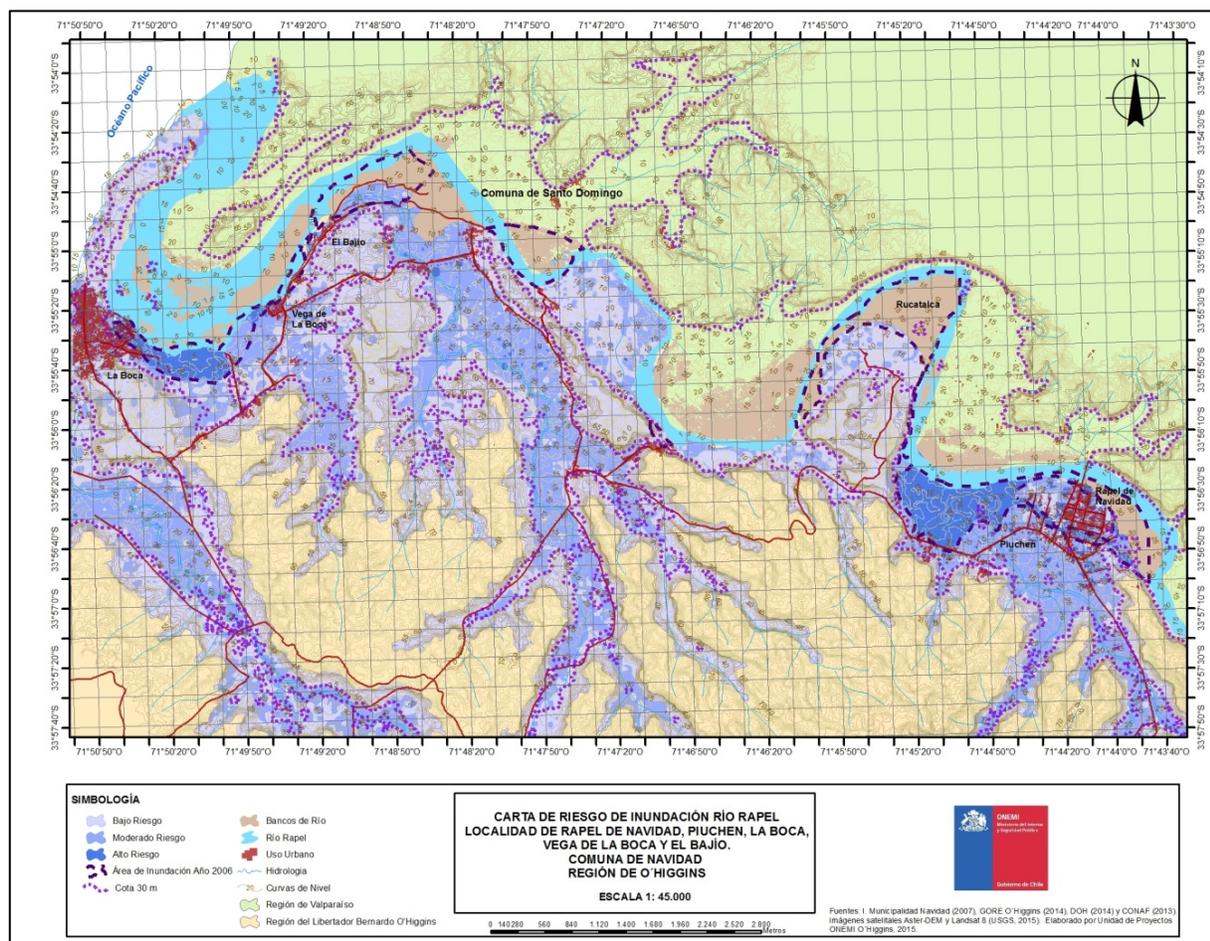
Categoría	Valor
Bajo Riesgo	1
Moderado Riesgo	2
Alto Riesgo	3

1) Bajo Riesgo: Considera áreas con bajo peligro de inundación, consecuencias menores en la inundación del año 2006 y baja exposición a inundación.

2) Moderado Riesgo: Corresponde a áreas con moderado peligro de inundación, consecuencias moderadas el año 2006 y moderada exposición a inundación.

3) Alto Riesgo: Se localiza en áreas con alto peligro de inundación, consecuencias mayores ocurridas el año 2006 y alta exposición a inundación.

Carta 5: Riesgo de Inundación río Rapel.



6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Análisis de los Factores de Riesgo de Inundación.

La localidad de Rapel de Navidad posee la mayor superficie en Riesgo de inundación fluvial con un 46,4% en Riesgo Alto y 46,5% en Riesgo Moderado, valores que se explican porque fue la más afectada durante la última inundación del año 2006, con un 31,5% de su superficie afectada con Consecuencias Mayores. Le sigue la localidad de La Vega con 34,4% de su superficie en Alto Riesgo y 60,6% en Riesgo Moderado, situación que se debe a la presencia de factores naturales favorables para ocurrencia de inundación, y reflejado en un 58% de su superficie en Peligro Alto (Ver Tabla 24 y 25).

La localidad de Piuchen se encuentra en tercer lugar en superficie, con categorías Riesgo Alto (31,2%) y Moderado (51,1%), y que se explica por el Peligro Alto que representa estero Rapel al desbordarse (37,8%), sumado a las importantes Consecuencias provocadas por la inundación del 2006 (25,1%). Por otra parte, La Boca posee un nivel de Riesgo Bajo (49,7%), aunque su valor de Riesgo Moderado es alto (34,7%) indicando una Exposición Alta frente a una crecida grande (23,1%). El Bajío también presenta un nivel de Riesgo Bajo (37,1%), aunque su nivel de Riesgo Moderado es igualmente importante (34,3%), por lo que frente a crecidas grandes puede ser afectada debido a su baja cota y pendiente.

Tabla 24: Factores de Riesgo por localidad.

Localidad	Peligro Alto (%)	Consecuencia Mayor (%)	Exposición Alta (%)
Rapel	31,92	31,54	28,17
Piuchen	37,89	25,18	29,37
La Vega	58	9,03	36,94
La Boca	11,98	11,68	23,16
El Bajío	10,12	3,07	20,24

Fuente. Elaboración propia, 2015.

Tabla 25: Categorías de Riesgo por localidad.

Localidad	% Alto	% Moderado	% Bajo
Rapel	46,40	46,47	13,04
La Vega	34,46	60,67	0,43
Piuchen	31,25	51,13	20,87
La Boca	14,39	34,77	49,73
El Bajío	0,34	34,37	37,14

Fuente. Elaboración propia, 2015.

Como se especificó anteriormente, el mayor Peligro o presencia de factores ambientales que inciden en la ocurrencia de inundaciones, se encuentran en las localidades de La Vega (58% de su superficie), seguidos de Piuchen (37,8%) y Rapel de Navidad (31,9%). Por otra parte, las mayores Consecuencias de la inundación del año 2006, se sintieron en Rapel de Navidad (31,5% de su superficie), seguida de Piuchen (25,1%). Finalmente, la localidad con Alta Exposición corresponde a La Vega con un 36,9%, seguido de Piuchen y Rapel de Navidad, que poseen valores muy similares en la categoría, con 29,3% y 28,1% de Alta Exposición, respectivamente.

6.2 Áreas Urbanas en Riesgo de Inundación.

Respecto a la afectación de áreas urbanas, el mayor porcentaje en Riesgo Alto de inundación es Rapel de Navidad (29,9%), seguido de Piuchen (19,9%) y La Boca (14,4%), siguiendo la tendencia de localidades afectadas por la inundación del 2006 (Ver Tabla 26). En este contexto, la población total afectada - directa o indirectamente - ascendería aproximadamente a 898 personas a nivel de todas las localidades.

Siguiendo la tendencia de localidades más pobladas, Rapel de Navidad es la de mayor afectación con 614 personas, seguidos de Piuchen con 109 personas, Vega de La Boca con 87 personas y El Bajío con 40 personas posibles de afectación. Las demás localidades, representan porcentajes de población muy marginal (Ver Tabla 27), aunque hay que señalar que La Boca en período de verano aumenta su población considerablemente, producto de los campings y segundas residencias que se emplazan en las áreas de mayor riesgo de inundación, por lo que hay que considerar este aumento de densidad en los planes de emergencia.

Tabla 26: Porcentaje de área urbana afectada.

Área urbana	% Alto Riesgo	% Moderado	% Bajo Riesgo
Rapel	29.92	63.73	6.34
Piuchen	19.98	70.45	9.58
La Boca	14.14	81.92	3.94
El Bajío	1.92	50.38	47.75
La Vega	13.68	75.42	0.92

Fuente. Elaboración propia, 2015.

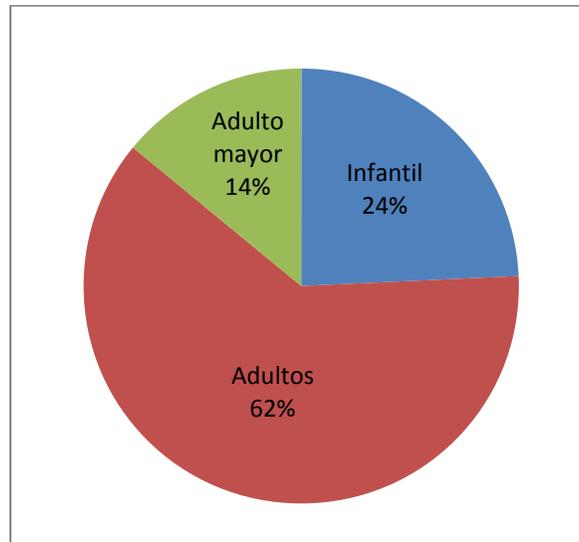
Tabla 27: Población posible de ser afectada.

Localidad	Población			
	Infantil	Adultos	3° Edad	Total
Rapel de Navidad	157	379	78	614
Piuchen	16	68	25	109
Vega de La Boca	26	55	6	87
El Bajío	9	26	5	40
Los Motores	4	10	5	19
Rucatalca	4	8	4	16
La Boca	2	8	3	13
Total	218	554	126	898

Fuente. SIIE-ONEMI, 2015.

Es importante considerar la estructura etaria de la población posible de ser afectada, pues a nivel de todas las localidades, aproximadamente el 38% de la población se encuentra en edad infantil y adulto mayor (Ver Gráfico 4), población vulnerable frente a situaciones de emergencia, principalmente al momento de declarar la evacuación de las zonas de inundación. Esta situación se hace muy compleja en Rapel de Navidad, pues del total de población (614), el 25,5% corresponde a población infantil y 12,7% pertenece a adulto mayor, por lo que se debe establecer o habilitar vías de evacuación accesibles para personas de edad que deben subir escaleras, así como carritos de evacuación para la población infante, entre otras medidas.

Gráfico 4: Estructura etaria población en áreas posibles de inundación.



Fuente: SIIE – ONEMI 2015.

En relación a la infraestructura posible de ser afectada por una inundación, Rapel de Navidad y La Boca concentran las 12 estructuras o instalaciones posibles de ser impactadas a nivel comunal, transformándose en áreas críticas que deben ser evaluadas año a año (Ver Tabla 28). De los 6 tipos de infraestructura crítica identificados, los establecimientos educacionales y edificios públicos son los que más afectación pueden tener frente a una crecida. Por otra parte, si el Puente de Rapel de Navidad se corta aísla la comuna, transformándose en una situación de vulnerabilidad para el abastecimiento de la población local. Otras instalaciones críticas son la Posta de Salud Rural, Carabineros y Bomberos de Rapel, así como la Escuela municipal de La Boca (Ver Anexo 9.2).

Tabla 28: Infraestructura posible de ser afectada.

Localidad	Infraestructura Crítica						Total
	Salud	Educación	Carabineros	Bomberos	Edificios Públicos	Vías Comunicación	
Rapel de Navidad	1	3	1	1	2	1	9
La Boca		1			2		3
Total	1	4	1	1	4	1	12

Fuente: SIIE – ONEMI 2015.

6.3 Situación de Riesgo por Localidad.

6.3.1 Localidad de Rapel de Navidad.

Fotografía 1: Localidad de Rapel de Navidad.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

En esta localidad, el Riesgo de inundación es alto con un 46,40% de su superficie en esta categoría, siendo la mayor entre todas las localidades estudiadas. Además posee aproximadamente la otra mitad de su superficie en la categoría Moderado Riesgo. La influencia del factor Consecuencias por su alta ponderación, elevan los niveles de riesgo, ya que esta localidad fue la más afectada en el año 2006 en su superficie total, con un 31,54% de su superficie con Consecuencias Mayores. El Peligro y la Exposición poseen un 30% cada uno en categoría Alta, aportando al riesgo final.

Las consecuencias en Rapel de Navidad, se detallan con un 20,85% de la población damnificada, 30,52% de los predios agrícolas afectados y un 38,56% de la superficie de la localidad afectada por la inundación, siendo impactos significativos.

Las variables de Peligro que generan estos niveles, son una permeabilidad moderada, un 70% de la superficie con niveles moderados de acumulación de la dirección de los flujos, la depositación aluvial en este sector es alta y moderada. Una variable relevante es la altura, ya que no todas las localidades poseen zonas consideradas inundables, Rapel posee aproximadamente el 2% inundable y casi un 70% moderadamente inundable.

La exposición a inundación considera la localidad con el mayor número de habitantes totales y superficies con usos de río en un 22% y 69% con terrenos agrícolas con categorías altas y moderadas.

6.3.2 Localidad de Piuchen.

Fotografía 2: Localidad de Piuchen.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

Los niveles de Riesgo de inundación obtenidos en Piuchen son un 51,13% perteneciente a la categoría Moderado Riesgo, siendo relevante además el 31,25% en Alto Riesgo. A causa de que la localidad de encuentra en un nivel de Alto Peligro, una Exposición Moderada y sufrió Consecuencias Mayores en el año 2006.

El Alto Peligro se ve influenciado por las variables depositación aluvial, un 70% de su territorio posee permeabilidad moderada, a diferencia de todas las localidades en las que predomina una permeabilidad muy alta. Además posee pendientes muy leves (menos de 2%) en casi la totalidad de su superficie, un 82,10% de la localidad posee alturas entre 15 y 25 metros (Moderadamente inundable). Es importante mencionar que esta localidad se ha visto afectadas por los desbordes de un estero que pasa por la localidad afectando a la población cercana, lo que se vincula con la alta carga aluvial que existe en el lugar, como se muestra en la fotografía 5.

Los niveles de exposición se corresponden con el uso de suelo, un 82% de la superficie corresponde a suelo agrícola significando que posee exposición moderada por la semi-densidad de la vegetación de este uso, además por el número total de habitantes (109).

En la inundación del año 2006, Piuchen se vio afectada en el 25,58% de su superficie con 0,12 km². Las variables más significativas corresponden a los damnificados y número de viviendas afectadas, ya que es la localidad con mayor porcentaje de afectación en estas categorías, con 30% y 15% respectivamente.

6.3.3 Localidad de Rucatalca.

Fotografía 3: Localidad de Rucatalca.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

Esta localidad no fue considerada para los factores de Consecuencias y Exposición, ya que la zona habitada de esta localidad no fue afectada en el evento del año 2006 debido a su gran distancia del río. Rucatalca se sitúa en una zona de depositación de sedimentos, por lo que presenta un moderado y alto peligro de inundación.

El riesgo de inundación de esta localidad corresponde a categorías de bajo riesgo y de moderado riesgo, influyendo directamente las categorías de peligro de inundación.

6.3.4 Localidad de El Bajío.

Fotografía 4: Localidad de El Bajío.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

El riesgo de inundación en esta localidad posee niveles bajos, el Alto Riesgo es casi nulo y un 34,37% en Moderado Riesgo, predominando el Bajo Riesgo con un 37,14%. Estos niveles menores son explicados principalmente por los bajos porcentajes de la población en Alto Peligro, siendo significativo ya que el factor Peligro posee una alta ponderación. De esta misma forma, las consecuencias de la inundación del año 2006 son consideradas como Menores un 60% aproximadamente. Y un 20% de la localidad se encuentra en una categoría de Exposición Alta.

El bajo Peligro del sector se debe mayormente a una baja acumulación de la dirección del flujo, una muy alta permeabilidad de las rocas, con mayor porcentaje de pendientes mayores a 2% y altura de entre 15 y 25 metros en toda la localidad, debido al emplazamiento del lugar, correspondiendo a una zona relativamente protegida por las pendientes más abruptas en el borde del río. Esta condición de bajo peligro nos da señales de que esta zona se encuentra más protegida tanto por su topografía como por la disposición de la localidad.

Los niveles bajos de consecuencias y exposición de El Bajío, se vincula con el bajo número de viviendas y habitantes totales, teniendo sólo valores significativos en los damnificados del año 2006 (24,24%) y en la superficie total afectada con un porcentaje de 18,44%

6.3.5 Localidad de La Vega de La Boca.

Fotografía 5: Localidad de La Vega de la Boca.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

La localidad de La Vega de la Boca, posee niveles de Riesgo significativos en casi la totalidad de su extensión, un 34,46% de su superficie posee una categoría de Alto Riesgo y un 60,67% en Moderado Riesgo. Estos niveles de Riesgo se explican de acuerdo a los componentes que integran el Riesgo, ya que La Vega posee Peligro de inundación alto en el 58% de su territorio y Moderado en un 35,72%. Las consecuencias no poseen mayor significancia en los niveles de riesgo, las Consecuencias Mayores poseen porcentajes bajos, predominando las Menores y Moderadas. Por otro lado, la Exposición es mayor, aportando al Riesgo, con 36,4% en la categoría Alta y 53,97% en Moderada.

Las variables que condicionan los altos niveles de Peligro en esta zona son las pendientes bajas del lugar, con un 89,38% en categoría muy leve y con alturas entre los 15 y 25 metros correspondiendo a zonas moderadamente inundables. Además aproximadamente el 90% de su territorio posee uso agrícola con moderada exposición. Aunque una variable que desfavorece a las inundaciones es la permeabilidad muy alta en el 100% de su territorio, debido a la cercanía de esta localidad al río, emplazada en un zona de depositación.

Las variables que aportan los niveles de Exposición, son el número de habitantes totales correspondiente a 70 y el alto porcentaje de terrenos agrícolas que implican una categoría de exposición moderada.

6.3.6 Localidad de La Boca.

Fotografía 6: Localidad de La Boca.



Fuente: ONEMI 2015 (Foto: Pamela Tapia).

La Boca posee una 11,98% de su superficie en Alto Peligro, 23,16% con Alta Exposición, 11,68% de su superficie tuvo consecuencias mayores en la inundación del año 2006. La integración de estos elementos genera para la localidad una categoría de Alto Riesgo de inundación de un 14,39% y 34,77% de Moderado Riesgo, incidiendo principalmente las condiciones de peligro de inundación y de exposición.

Las principales variables que condicionan estas categorías de peligro son la alta depositación aluvial en esta localidad, la presencia en casi la totalidad del terreno pendientes menores a 2% y zonas con baja altura, considerada en zona inundable y moderadamente inundable. Las variables que disminuyen la ocurrencia de inundaciones corresponden a la muy alta permeabilidad de la zona (71,8% en esta categoría) y la presencia de vegetación con usos de uso de bosque en un 60,75% de la localidad.

Respecto a las variables que condicionan su exposición, son el gran número de viviendas que posee la localidad (649) respecto a sus habitantes totales (614), debido a la alta presencia de viviendas de segunda residencia utilizadas en épocas estivales, que en los últimos años se localizan en terrenos más cercanos al río correspondiendo a zonas de depositación. Además posee un gran porcentaje de superficie con uso agrícola, dándole una condición de exposición moderada a causa de la presencia de vegetación semi-densa en este tipo de uso.

Las consecuencias de la inundación del año 2006 en esta localidad fue significativa respecto a la totalidad de la superficie que fue afectada (13,45% de la localidad y 0,32 km²) pero en términos de porcentajes en relación a la totalidad de habitantes y viviendas sufrió consecuencias menores y moderadas en los predios agrícolas afectados (12,49%).

6.4 Percepción de la Población Local.

De las entrevistas realizadas a residentes afectados por inundaciones en el pasado, se puede sugerir que en general existe una percepción de exposición importante a las inundaciones, parcialmente disminuida en sectores con obras de mitigación, aunque no quita la sensación de inseguridad al riesgo. En este contexto, se identifica a una comunidad dispuesta a informarse y comprometida a iniciar procesos de prevención, mitigación y alerta/alarma.

A continuación se entregan algunas de las percepciones recogidas a los pobladores, en función de las siguientes temáticas planteadas:

<p>Recurrencia Histórica</p>	<p>Última inundación año 2006. Inundaciones anteriores años 1982, 1984, 1986 y 1997. Mayor intensidad inundación del año 1982. <i>“La inundación de hace 25 años (1984), se inundó hasta los arcos de fútbol de la cancha (...) mientras que el año 2006 se inundó sólo la zona ribereña del camping.”</i> (Rafael, 53 años, La Boca).</p>
<p>Percepción de exposición a inundación</p>	<p>Existe percepción de que están expuestos actualmente a las inundaciones, esto se ve parcialmente disminuido en sectores con obras de mitigación. <i>“Tengo miedo que nos pase de nuevo, es nuestro miedo que venga de repente la inundación”</i> (Rosa, 73 años, La Boca) <i>“Sentimos que nos puede volver a ocurrir en cualquier momento”</i> (Antonio, 59 años, Piuchen)</p>
<p>Comparación de Riesgos</p>	<p>Mayor temor a las inundaciones que a otras variables de riesgo como terremotos o tsunamis. Atribución a la falta de aviso y a la inmediatez del fenómeno. Vinculación de los terremotos con la central Rapel. <i>“Le temo más a una inundación que a un terremoto. Para el año 2010 evacuamos a las zonas altas por miedo a que la Central se rompa”</i> (María, 35 años, Rapel) <i>“Más temo al río que a un tsunami, porque el río viene de repente y por el tsunami nos avisan”</i> (Rosa, 73 años, La Boca).</p>

<p>Origen de las crecidas</p>	<p>Central Rapel: Relación entre la central Rapel con las inundaciones, mal manejo de las evacuaciones ya que existe nula comunicación cuando éstas cuando ocurren. Temor de la población por la existencia de una fisura en la central que pueda generar rompimiento del muro, debido a un terremoto, y evacúe grandes cantidades de agua. <i>“Nosotros tenemos miedo de que se rompa la central por fisuras”</i> (Violeta, 54, La Vega de la Boca) <i>“Queremos matar el mito de la fisura de la Central, porque genera temor en la población”</i> (Lautaro, 60 años, Rucatalca)</p> <p>Precipitaciones: Mínimo hace seis años ha existido una disminución sostenida de las precipitaciones, han pasado de días consecutivos a sólo horas. <i>“El año 2006 fue el último año que llovió más, pero hace quince años que no llueve fuerte”</i> (Héctor, 72 años, Rapel de Navidad).</p>
<p>Prevención, Mitigación y Resiliencia</p>	<p>Las personas que tienen una mayor exposición frente a la variable de inundación han desarrollado una cultura resiliente debido al número de veces que han resultado afectados. Dada las pérdidas materiales y productivas, generando sistemas de prevención y mitigación, desde un ámbito de acción familiar. <i>“Ahora tenemos un muro de contención que construimos alrededor de la casa”</i> (Diego, 28 años, Rapel). <i>“No hay más seguridad con el muro (MOP 2007), porque el agua pasa por donde sea, va a entrar igual por las puntas, cuando llueve más de dos días seguidos, levantamos las cosas de la casa y nos turnamos en la noche para ver cómo se comporta el río”</i> (Elba, 53 años, Rapel)</p>
<p>Rehabilitación y Recuperación de daños.</p>	<p>Los principales daños en las viviendas son producto de la entrada de flujos de agua, alcanzando niveles de hasta un metro. Por lo que la evacuación debió realizarse en botes, siendo la recuperación de daños la más prolongada, con una duración de hasta 1 año para recuperar sus actividades cotidianas y productivas. <i>“Me demoré en arreglar todos los daños del año 2006 una</i></p>

temporada completa” (Samuel, 65 años, Las Rocas de Sto. Domingo)

“Tuvimos en la casa dos semanas de mal olor, podrido y humedad. Además debimos remover el barro, secando y limpiando las cosas.” (Elba, 53 años, Rapel)

“Tuvieron que sacarnos en bote, el agua llegó hasta las ventanas a un metro de altura, por un mes tuve que estar limpiando” (Julio, 73 años, Vega de la Boca)

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La ocurrencia de sistemas frontales en Chile central, ha generado diversas inundaciones en el río Rapel, cuyo origen es tanto natural como provocado por la acción humana de la Central Hidroeléctrica Rapel, que al evacuar su caudal de exceso, ha afectado a localidades situadas río abajo de la represa, con consecuencias desastrosas para población, viviendas, predios agrícolas, ganado e infraestructura pública.

Desde el año 1982 a la fecha, se han identificado 7 eventos de inundación, donde las evacuaciones importantes ocurren en años del Fenómeno del Niño, con umbrales de caudal evacuado superiores a 8.000 m³/s y precipitaciones mayores a 500 mm/año. El último evento ocurrió en julio del 2006, afectando las localidades de Rapel de Navidad con 32 viviendas con daño y 128 personas damnificadas, interrupción de vías y caminos rurales, y La Boca con 20 viviendas afectadas, 20 personas damnificadas y la pérdida de instalaciones del sindicato de pescadores local.

En este contexto, del análisis de los registros históricos entregados por la Central Rapel nos da una herramienta clave para determinar valores umbrales de ocurrencia de inundaciones: Para caudales máximos evacuados en 1 día, se establece que el umbral de riesgo de inundación por evacuación, corresponde a caudales superiores a 3600 m³/s vaciados en un día. Esto representa una relación directa entre los caudales y el tiempo total de evacuación, estimándose que la proporción entre ellos debe ser mayor a 0,008 (umbral crítico) para descargas con poco tiempo de evacuación.

Respecto al modelo espacial generado en SIG, es necesario tomar en cuenta las limitantes que posee, ya que se crearon variables en base a la información disponible, pudiendo mejorar el modelo integrando más variables, tanto del aspecto ambiental como de carácter social. Por otro lado, la consideración de la vulnerabilidad como consecuencias dentro de los componentes del riesgo ha sido hecha considerando la importancia de contar con esta información de eventos de inundación e integrar la información disponible por la institución al modelo.

Las localidades que presentan mayor superficie en Riesgo de inundación corresponden a Rapel de Navidad (46,4%), La Vega (34,6%) y Piuchen (31,2%), influenciado el riesgo por el contexto de cada localidad, como la presencia de esteros o quebradas, viviendas de segunda residencia y emplazamiento local. Por otra parte, El Bajío posee la menor superficie en riesgo de inundación.

Para el Peligro de inundación, la localidad con mayor peligro es La Vega con un 58% de su superficie. También es La Vega la localidad más Expuesta a inundación con un 36,9% de su superficie total. Finalmente, las mayores Consecuencias de la inundación del 2006, se hicieron sentir en la localidad de Rapel de Navidad con un 31,5% de su superficie total afectada.

En relación a las variables más influyentes en el factor Peligro son la pendiente del terreno con un promedio de 93,2% en la categoría de pendiente muy leve (menos de 1°), las áreas de depositación aluvial con promedio de 53% en categoría de alta carga aluvial, la altura con 76% de promedio en la categoría moderadamente inundable (entre 15 y 25 m.s.n.m) y la acumulación de la dirección de los flujos de agua con un 55% en la categoría moderada.

En el factor Consecuencias la variable con un mayor promedio es la superficie total afectada con un 28%, luego los predios agrícolas afectados con 22,28%. Respecto a la Exposición a inundación, esta se ve influida por los usos de suelo con promedio 70% en categoría terrenos agrícolas (moderada exposición) y el número de habitantes totales.

A nivel de todas las localidades, es importante considerar la estructura etaria de la población posible de ser afectada, pues, aproximadamente el 38% de la población se encuentra en edad infantil y adulto mayor, población vulnerable frente a situaciones de emergencia y evacuación, por lo que se debe establecer o habilitar vías de evacuación accesibles para personas de edad que deben subir escaleras, así como carritos de evacuación para la población infante, entre otras medidas.

La percepción de la comunidad de las localidades ribereñas nos da señales del contexto en que hasta ahora ha sido abordado el tema del riesgo de inundación en el área de estudio, tanto por la Municipalidad como por la Central, ya que claramente se muestra la existencia de desconfianza de la comunidad por el mal funcionamiento de la central y la poca o nula información sobre estos eventos y la ayuda recibida posteriormente. Principalmente se puede apreciar la acción de la población por conocimiento propio del sector y del comportamiento del río, lo que genera incertidumbre en muchos casos debido a la rapidez de la crecida y desborde del río.

Sobre las recomendaciones, se plantean tres aspectos relevantes a considerar:

1.- Actualizar el plan de emergencias ante evacuación de crecidas:

- Se recomienda que la empresa Endesa de aviso a la autoridad competente cuando los caudales se acerquen a un umbral 1 o mayor a 3.000 m³/s/día, esto con el fin de crear un

sistema de alerta temprana preventiva y/o alerta amarilla que active el sistema de protección civil (informar).

- El umbral crítico que puede generar condiciones de crecida son 3.600 m³/s/día, considerado como umbral de alerta roja.
- Se recomienda actualizar los protocolos y canales de comunicación, generando estándares de información pertinentes para la sociedad civil (Municipalidad, Encargado de emergencias, Dirigentes comunales).
- Se recomienda que la empresa, actualice la información de caudales y periodos de retorno para futuros análisis de riesgos.
- Se recomienda que la empresa, en coordinación con la autoridad local, den aviso del aumento del caudal del río, principalmente en las tardes por acción de generación eléctrica, pues en época estival los veraneantes (foráneos en su mayoría) no conocen el comportamiento del río.

2.- Trabajo coordinado con la comunidad:

- Se recomienda crear una mesa de trabajo entre los principales actores de la comuna respecto a esta temática, ya sea dirigentes comunales y representantes de la comunidad, la Municipalidad, los servicios públicos correspondientes (MOP, DGA, ONEMI) y la Central Rapel para generar vínculos de comunicación y confianza. Estas instancias de comunicación son clave para mejorar el funcionamiento y la coordinación ante posibles emergencias en la zona.
- Incluir a la población de las localidades afectadas en los procesos informativos, de difusión y de decisión sobre los riesgos de la comuna, con charlas de información en torno a posibles riesgos naturales y provocados por la acción humana, para que tengan una mejor capacidad de respuesta y resiliencia.
- En este contexto, considerar la estructura etaria de la población local donde existe un 38% de la población en edad vulnerable

3.- Apoyar la planificación territorial comunal:

- Se recomienda incluir la presente Carta de Riesgo de Inundación al Plan Regulador Comunal como acción preventiva frente al desarrollo de nuevos proyectos inmobiliarios o productivos.
- Este proceso puede ser apoyado vía ordenanza municipal que incluya la zonificación de riesgos naturales, apuntando a brindar seguridad a la comunidad y un mejor uso del territorio.

8 BIBLIOGRAFÍA

Araujo P. Sousa M. & Bezerra F. (2009). "Geotecnologias: Princípios e Aplicações nas geociências". Revista de Geografia, Universidad Federal de Pernambuco, Brasil.

Ayala-Carcedo, F. & Olcina, J. (2002). "Riesgos Naturales". Barcelona, España: Editorial Ariel S.A.

Bosque, J; Ortega, A; & Rodríguez, V. (2005). "Cartografía de Riesgos Naturales en América Central con datos obtenidos desde internet". Doc. Anál Geogr. 45. 41-70.

Butler, K. (2013). "Combinaciones de banda para Landsat 8". Obtenido el 2 de febrero de 2015 desde <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2013/07/24/band-combinations-for-landsat-8/>

Chu, H; Lin, Y; Huang, C; Hsu, C. & Chen, H. "Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model". Hydrological Processes, 2010, Vol. 24, N° 18, p. 2538-2554.

CIREN. (1999). "Materiales y Símbolos". Centro de Información de Recursos Naturales.

CONAF (2013). "Catastro de Bosque Nativo". Ministerio de Agricultura.

DGA (2004). "Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad, Cuenca del Río Rapel". Ministerio de Obras Públicas

DIRPLAN (2012). "Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021 - Región del Libertador General Bernardo O'Higgins". Ministerio de Obras Públicas.

ENDESA (2015). Datos estadísticos evacuaciones por exceso y tiempo de evacuación desde el año 1975 al 2006.

Folk R. (1974). "Petrology of sedimentary rock". Hemphill Publishing Company, Austin, Texas 78703.

Gómez, M. y Barredo, J. (2005). "Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio".

INE (2005). Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos. Ministerio de Economía.

International Rivers (2007). "Un Desastre Producido por las Represas: Cómo las Represas Grandes y los Diques han Empeorado las Inundaciones en la India". Obtenido el 3 de febrero de 2015 desde <http://www.internationalrivers.org/es/resources/>

National Weather Service. (2014). "Climate Prediction Center, Southern Oscillation". Obtenido el 15 de enero de 2015 desde <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.

ONEMI (2008). "Diagnóstico Zonas Vulnerables por Crecidos de Embalses". Dirección Regional del Libertador Bernardo O'Higgins.

Ollero, A. (1997). "Crecidas e Inundaciones como Riesgo Hidrológico. Un Planteamiento Didáctico". Instituto Geográfico Vasco, Lurralde inves esp 20. 261-283.

Rojas, O.; Martínez, C. y Jaque, E. (2011). "Recurrencia histórica por inundación fluvial en el curso inferior del río Carampangue, Región del Bio-Bío". Revista Tiempo y Espacio.

Rojas, O.; Mardones, M.; Arumí, J.; y Aguayo, M. (2014). "Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos". Revista de geografía Norte Grande, (57), 177-192.

Saaty, T. (1980). "The Analytic Hierarchy Process". Ed. McGrawHill.

Seco, R. (1996). "El enfoque físico – geográfico para el estudio de los peligros naturales en el ejemplo de la provincia Ciudad de la Habana". Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. Tesis de Maestría. 89p.

UNESCO, Dirección General de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Comisión Europea, Cruz Roja Chilena, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo & ONEMI (2012). "Análisis de riesgo de desastres en Chile. VII Plan de acción DIPECHO en Sudamérica 2011-2012".

USGS (2011). Modelo Digital de Elevaciones. ASTER GDEM del 17 de octubre de 2011. Obtenido el 3 de enero de 2015 desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>

USGS (2013). Imagen Satelital Landsat 8 del 3 de enero de 2015. Obtenida el lunes 5 de enero de 2015 desde <http://earthexplorer.usgs.gov/>

9 ANEXOS

9.1 CAUDALES ANUALES VACIADOS ENTRE 1975 A 2006, CENTRAL RAPEL.

Año	Caudal evacuado por exceso m ³ /s	Precipitación mm	Tiempo de evacuación (segundos)	Horas	Máximo Caudal evacuado en 1 día m ³ /s	Día	Tiempo de evacuación (segundos)	Proporción	ENOS
1975	5,519	500	1,209,900	336.08	1,572.490	11 Julio	377,400	0.0042	-0.10
1976	0	439						0.0000	-0.10
1977	12,755	848	2,241,900	622.75	3,620	23 Julio	472,500	0.0077	0.40
1978	13,813	662	2,540,100	705.58	2,524	19 Julio	340,200	0.0074	-0.30
1979	0	520						0.0000	0.00
1980	16,741	895	3,644,340	1,012.32	2,081	11 Mayo	279,940	0.0074	0.30
1981	998	461	246,300	68.42	423	2 Junio	104,400	0.0041	-0.40
1982	51,193	1113	8,367,840	2,324.40	5,442	27 Junio	578,400	0.0094	0.70
1983	3,459	417	860,100	238.92	705	8 Julio	160,200	0.0044	0.60
1984	18,324	990	2,735,880	759.97	3,958	5 Julio	491,100	0.0081	-0.50
1985	0	285						0.0000	-0.60
1986	16,692	827	2,419,920	672.20	4,325	17 Junio	478,200	0.0090	0.00
1987	26,930	946	2,540,580	705.72	4,468	15 Julio	355,200	0.0126	1.20
1988	205	330	52,200	14.50	205	21 Julio	52,200	0.0039	-0.10
1989	2,485	344	279,300	77.58	1,363	24 Agosto	109,800	0.0124	-0.40
1990	0	261						0.0000	0.20
1991	6,979	659						0.0000	0.70
1992	18,160	907						0.0000	0.70
1993	5,230	512	678,000	188.33	1,365	2 Julio	172,800	0.0079	0.50
1994	4,095	383	578,940	160.82	1,375	25 Julio	129,000	0.0107	0.40
1995	271	408	21,600	6.00	156	30 Julio	36,000	0.0043	0.00
1996	0	331			0		0	0.0000	-0.20
1997	26,289	968	2,939,820	816.62	4,605	21 Julio	345,600	0.0133	1.20
1998	225	111	39,600	11.00	19	3 Enero	39,600	0.0005	-0.20
1999	1,724	404.7	270,900	75.25	805	7 Septiembre	111,600	0.0072	-0.10
2000	27,222	854	3,308,880	919.13	11,349	26 Junio	1,493,280	0.0076	-0.70
2001	9,267	674.1	1,211,400	336.50	3,104	19 Julio	298,800	0.0104	-0.10
2002	21,736	794	2,534,100	703.92	3,947	25 Agosto	318,600	0.0124	0.70
2003	184	417.3	12,600	3.50	184	22 Enero	1,800	0.1022	-0.10

2004	0	425.4							0.30
2005	20,130	603.6	2,503,800	695.50	1,732	16 Junio	212,400	0.0082	0.30
2006	8,975	506.6	1,059,480	294.30	3,601	12 Julio	275,400	0.0131	0.10
2007	0	228.5							
2008	0	498.4							
	Umbral Caudal Anual 8.000 m3/s	Umbral Precipitación 500 mm			Umbral Caudal 3600 m3/s			Umbral Proporción 0.008	

9.2 INFRAESTRUCTURA CRÍTICA POSIBLE DE SER AFECTADA

Rapel Navidad:

- Posta Salud Rural Rapel de Navidad
- Escuela Municipal de Francisco Chavez, enseñanza básica y media.
- Escuela Los Pececitos, enseñanza pre-básica y básica.
- Escuela Los Botecitos, enseñanza pre-básica y básica.
- Carabineros, Reten Rapel de Navidad.
- Bomberos de Rapel
- Edificios Públicos Municipales (2)
- Vías de Comunicación: 1 Puente

La Boca:

- Escuela Municipal de La Boca, enseñanza básica y media.
- Edificio Público: Polideportivo de La Boca.
- Embarcadero Sindicato de Pescadores Artesanales.

9.3 FICHAS DE TERRENO

Entrevistas Área de Inundación Río Rapel

N° Ficha:	Fecha:
-----------	--------

Nombre:	
Edad:	
Localidad:	
Tiempo de residencia:	

Hasta dónde avanzó el río (Referencias: casas, caminos, estructuras, etc)	
Percepción sobre la central Rapel	
Se siente expuesto actualmente a las inundaciones:	
Comparación de riesgos naturales: Terremotos, tsunamis	

Observaciones:	
----------------	--

Área de Inundación Río Rapel

N° Ficha:	Fecha:
-----------	--------

Localidad:	
Coordenadas:	
Altitud:	
Zona:	Relleno: <input type="checkbox"/> Disección: <input type="checkbox"/>
Tipo Terraza:	T'': <input type="checkbox"/> T': <input type="checkbox"/> T1: <input type="checkbox"/>

Vegetación:	
Densidad	Muy Abierto: <input type="checkbox"/> SemiDenso: <input type="checkbox"/> Denso: <input type="checkbox"/>
Tipo Forestal	Pasto: <input type="checkbox"/> Arbusto: <input type="checkbox"/> Árbol: <input type="checkbox"/>
Orden	Regular: <input type="checkbox"/> Irregular: <input type="checkbox"/>
Uso de suelo	Agrícola: <input type="checkbox"/> Forestal: <input type="checkbox"/> Río: <input type="checkbox"/> Urbano: <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Depósitos de sedimentos fluviales:	
Espesor	
Dirección	
Rumbo	
Sorteo	

Observaciones:	
-----------------------	--