



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**“IMPACTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN ZONAS DE  
INUNDACIÓN DE LA ISLA DE MAIPO, CHILE”**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**FELIPE IGNACIO AHUMADA VALLEJOS**

PROFESOR GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAMES MCPHEE TORRES  
RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA

SANTIAGO-CHILE  
NOVIEMBRE 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL  
POR: Felipe Ignacio Ahumada Vallejos  
FECHA: Lunes 19 de noviembre de 2012  
PROF. GUÍA: Sra. Ximena Vargas M.

“IMPACTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN ZONAS DE INUNDACIÓN DE LA  
COMUNA DE ISLA DE MAIPO, CHILE”

Debido al Calentamiento Global se proyectan en el mundo variaciones tanto en las precipitaciones como en las temperaturas. En general en la zona central de Chile los Modelos de Circulación Global de la atmósfera coinciden en que se tendrá un aumento de la temperatura y muchos de ellos proyectan un incremento en la intensidad de la precipitación diaria, aunque con una disminución de la precipitación total anual. En consecuencia, el efecto de estos cambios debe analizarse localmente para estudiar los efectos que puedan ocasionar sobre las crecidas. Como consecuencia de este cambio, podrían generarse problemas, entre otros, asociados a caudales de crecidas, aumentando la frecuencia con las que éstas ocurren así como también su magnitud. Por ello, con el objetivo de aportar información para una futura planificación del manejo de cauces, en este estudio se analiza el impacto que se puede ocasionar sobre las zonas de inundación en un lugar específico de Chile, la comuna de Isla de Maipo, que a la fecha no cuenta con ningún plan de manejo.

Usando el programa WEAP, se modela hidrológicamente a nivel diario la cuenca Maipo en San Alfonso, ubicada en la cordillera de la Región Metropolitana de Chile, caudal que se usa para determinar los caudales en un punto de control aguas abajo de la cuenca, ubicado en la comuna de Isla de Maipo en la misma región. Estos caudales son proyectados en el mediano plazo (2040-2070) al escenario futuro A1B el cual se basa en un equilibrio socio-económico a nivel mundial, donde se incorporan balanceadamente matrices energéticas de distinta fuente. Usando correlaciones establecidas entre caudales a nivel diario y el caudal máximo instantáneo en las estaciones Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano, se derivan estos últimos en el punto de control a la entrada de la comuna.

A base de resultados disponibles en estudios anteriores se comparan los caudales con períodos de retorno entre 2 y 200 años con los caudales generados para el escenario futuro. Estos caudales son los valores de entrada en la modelación hidráulica del cauce, que se realizó con el programa HEC-RAS. La superficie de inundación obtenida para cada crecida fue georeferenciada y con la cartografía de la zona se generan mapas de inundación. En este informe se presentan 8 mapas, correspondientes a los períodos de retorno 2 y 200 años, para régimen pluvial y nival, en línea base y escenario futuro.

Los mapas obtenidos muestran que la zona de estudio presenta una inundación frecuente, definida por crecidas con períodos de retorno menores a 5 años. Asimismo, se aprecia que la zona posee pocas defensas fluviales y que son prácticamente inservibles para crecidas mayores.

Las proyecciones realizadas en este estudio reafirman las conclusiones obtenidas en otros estudios. En particular, las precipitaciones disminuyen alrededor de un 30% lo que da origen a una disminución del caudal medio diario en la cuenca Maipo en San Alfonso en un 24% en su valor promedio anual. Del análisis de frecuencia realizado tanto para los caudales futuros como los de línea base se observó que existe, efectivamente, un aumento en el caudal asociado al período de retorno de 200 años, donde en el escenario futuro el caudal es mayor que en la línea base, mientras que los caudales asociados a períodos de retorno menores disminuyen.



**A MI FAMILIA**

## AGRADECIMIENTOS

Muchos sentimientos se mezclan en esta etapa final de un proceso, que al comienzo pareció ser infinito, pero que llegado el momento se mira hacia atrás y uno se pregunta cómo sería posible que todo pasara tan rápido. Sentimientos de alegría, felicidad y satisfacción por los logros alcanzados, sentimientos que en más de algún momento de la carrera se vieron esquivos. Tristeza y nostalgia por dejar atrás a una gran familia que me acompañó durante todos estos años, en los cuales compartimos casi todas las emociones que la vida puede dar.

Quisiera agradecer expresamente a mis padres, ellos me formaron de valores y me dieron las herramientas necesarias para abordar los problemas con la frente en alto, guiándome por una senda correcta incluso en las situaciones más inverosímiles.

La familia es el pilar fundamental de soporte del ser humano, y como los padres, otro elemento muy importante son los hermanos. A mi hermana quisiera agradecerle su disposición para siempre escucharme en esos momentos en los cuales necesitaba de compañía. A mis otros hermanos, esos que hice en el colegio y que me han acompañado en mi vida por más de 10 años, quisiera agradecerles a la distancia la gran capacidad de apoyo que poseen y la amistad que siempre me han entregado por sobre todas las cosas, una amistad que bien podría ser confundida con un lazo de sangre.

En este largo camino tuve la ventaja y suerte de poder contar con la compañía de mis abuelos, los cuales me recibieron en su hogar por medio año, dándome todo el apoyo y atención para poder sortear el difícil primer año en la universidad, a ellos, gratitud y alegría por poder contar con ustedes.

No necesito hacer memoria para acordarme de la gran familia que he formado en el departamento de Ingeniería Civil, durante todo este tiempo me he sentido como estar rodeados de compañeros de colegio, inocentes y bondadosos, limpios de esa competitividad y envidia que ensucia nuestro entorno. Deseos tengo de poder seguir compartiendo con ustedes cada vez que se pueda, a pesar de que serán muchas menos veces que antes, sé que serán igual de intensas y de anecdóticas. Gracias a ustedes es que muchas veces me levanté para ir a la universidad, siendo un pretexto la cátedra correspondiente, gracias por estar en las buenas y en las malas apoyándonos entre todos para pasar las adversidades y esos ramos que tanto odiamos a rato, espero que todos ustedes sean capaces de alcanzar lo que sea que se hayan propuesto.

Y si estamos hablando de la familia universitaria, me faltaría hablar de los “padres”. A mi profesora guía, Ximena, quisiera agradecerle toda la dedicación y apoyo que me entregó durante todo este proceso de titulación, siendo fundamental para que ahora pueda estar escribiendo estas palabras. Su dedicación y pasión a la Hidrología se traspa de generación en generación, entregándome más razones para saber que este camino que escogí ha sido el adecuado.

A mis profesores integrantes de la comisión, toda la gratitud por el apoyo y los consejos que me dieron para alcanzar un mejor trabajo.

Finalmente, quisiera agradecerle a una persona muy especial, su apoyo ha sido incondicional durante esta tarea. Su amor, fundamental. Retándome o felicitándome cuando ha sido necesario, un amor incondicional que ha sabido entregarme sobre todo en los momentos más opacos, en los momentos de mayor necesidad. Espero poder estar a la altura de todo lo que has hecho tú por mí.

Gracias todos y a cada uno de ustedes por acompañarme y aportar de su granito de arena para que pudiera alcanzar esta inmensa satisfacción.

## ÍNDICE

---

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1 Motivación .....	2
1.2 Objetivos y Alcance.....	2
1.2.1 Objetivos generales.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.2.3 Alcance .....	3
1.3 Organización del Informe .....	4
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO DEL MODELO HIDROLÓGICO .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>16</b>
4.1 Descripción Cuenca Maipo en San Alfonso .....	17
4.2 Descripción Comuna de Isla de Maipo .....	22
<b>CAPÍTULO 5. RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS.....</b>	<b>25</b>
5.1 Fluviometría .....	25
5.2 Precipitación .....	26
5.3 Temperatura .....	29
5.4 Fracción de Nubosidad .....	32
5.5 Embalse el Yeso.....	33
<b>CAPÍTULO 6. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....</b>	<b>35</b>
6.1 Calibración Maipo en San Alfonso.....	36
6.2 Validación Maipo en San Alfonso.....	38
<b>CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DEL MODELO WEAP A ESCENARIO FUTURO .....</b>	<b>43</b>
7.1 Análisis de Información del modelo meteorológico PRECIS. ....	43
7.2 Resultados Futuros.....	46
<b>CAPÍTULO 8. ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN PUNTO DE CONTROL.....</b>	<b>49</b>
8.1 Caudales máximos instantáneos Maipo en el Manzano .....	49
8.2 Caudales máximos instantáneos Río Maipo después del Río Angostura .....	52
8.2.1 Río Maipo antes de Río Angostura .....	52
8.2.2 Río Angostura.....	53
<b>CAPÍTULO 9. GENERACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN.....</b>	<b>56</b>
9.1 Recopilación de Información.....	56
9.2 Modelación del Eje Hidráulico .....	56
<b>CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO A: MAPAS DE INUNDACIÓN LÍNEA BASE .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO B: MAPAS DE INUNDACIÓN ESCENARIO FUTURO.....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1. Parámetros de suelo y terreno de WEAP .....	11
Tabla 3.2. Parámetros meteorológicos y climatológicos de WEAP .....	12
Tabla 4.1. Elevación Media Bandas de Elevación Maipo en San Alfonso .....	18
Tabla 4.2. Valores Agroclimáticos Río Maipo en San Alfonso .....	19
Tabla 4.3. Distritos Agroclimáticos Comuna Isla de Maipo .....	22
Tabla 5.1. Estaciones Pluviométricas Seleccionadas .....	27
Tabla 5.2. Valores Regresión Lineal .....	29
Tabla 5.3. Estaciones de temperatura Seleccionadas .....	30
Tabla 5.4. Valores correlación lineal.....	32
Tabla 5.5. Fracción de Nubosidad.....	33
Tabla 5.6. Características Embalse el Yeso.....	33
Tabla 5.7. Disponibilidad de Datos Evaporación Embalse el Yeso .....	34
Tabla 6.1. Parámetros de Ajuste Calibración .....	36
Tabla 6.2. Caudales medios diarios máximos anuales (m <sup>3</sup> /s) Maipo en San Alfonso Ordenados, Línea Base.....	42
Tabla 7.1. Caudales medios diarios máximos anuales (m <sup>3</sup> /s) Maipo en San Alfonso ordenados, futuro.....	47
Tabla 8.1. Caudales medios diarios observados máximos anuales (m <sup>3</sup> /s) estación Maipo en el Manzano.....	50
Tabla 8.2. Caudales máximos instantáneos anuales observados (m <sup>3</sup> /s) Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano .....	50
Tabla 8.3. Caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano período nival, escenario futuro.....	52
Tabla 8.4. Caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano período pluvial, escenario futuro.....	52
Tabla 8.5. Área cuencas Maipo en el Manzano y Maipo antes del Angostura .....	52
Tabla 8.6. Rendimiento hídrico Maipo en el Manzano y Maipo antes de Angostura .....	53
Tabla 8.7. Caudales máximos instantáneos (m <sup>3</sup> /s) escenario futuro Maipo antes de Angostura.....	53
Tabla 8.8. Caudales generados (m <sup>3</sup> /s) estudio A&C .....	54
Tabla 8.9. Caudales generados (m <sup>3</sup> /s) Línea Base (elaboración propia) .....	54
Tabla 8.10. Caudales generados (m <sup>3</sup> /s) escenario Futuro (elaboración propia) .....	55
Tabla 9.1. Niveles de Información de la base cartográfica del SIG.....	56
Tabla 9.2. Mapas Elaborados .....	59

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Línea evolutiva de las familias de escenarios.....	8
Figura 3-1. Esquema Gráfico Modelo WEAP.....	10
Figura 3-2. Esquema de modelación en WEAP.....	13
Figura 4-1. Sistema de Estudio.....	16
Figura 4-2. Ubicación Cuenca controlada por la estación Maipo en San Alfonso.....	17
Figura 4-3. Bandas de Elevación cuenca delimitada por Maipo en San Alfonso. ....	18
Figura 4-4. Distritos Agroclimáticos cuenca Maipo en San Alfonso.....	19
Figura 4-5. Principales Cauces cuenca Maipo en San Alfonso.....	20
Figura 4-6. Uso de Suelo cuenca Maipo en San Alfonso.....	21
Figura 4-7. Curva de Variación Estacional Río Maipo en San Alfonso.....	22
Figura 4-8. Ubicación Comuna de Isla de Maipo.....	23
Figura 4-9. Distritos Agroclimáticos Comuna de Isla de Maipo.....	23
Figura 4-10. Uso de Suelo Comuna Isla de Maipo.....	24
Figura 5-1. Caudal medio diario en Maipo en San Alfonso.....	25
Figura 5-2. Estaciones Fluviométricas.....	26
Figura 5-3. Estaciones con información de precipitaciones escogidas. ....	27
Figura 5-4. Precipitaciones diarias observadas estación base Pirque.....	28
Figura 5-5. Gradiente de Precipitación.....	28
Figura 5-6. Estaciones con datos de temperatura escogidas.....	30
Figura 5-7. Temperaturas medias diarias observadas estación base Pirque.....	31
Figura 5-8. Gradientes de Temperatura.....	31
Figura 5-9. Curva de Almacenamiento del Embalse el Yeso.....	34
Figura 5-10. Evaporación Observada Embalse el Yeso.....	34
Figura 6-1. Resultados Calibración. Hidrograma.....	37
Figura 6-2. Resultados Calibración. Caudal Anual.....	37
Figura 6-3. Resultados Calibración. Caudales medios mensuales.....	37
Figura 6-4. Resultados Calibración. Curva de Duración.....	38
Figura 6-5. Resultado Validación. Hidrograma.....	38
Figura 6-6. Resultados Validación. Caudal Anual.....	39
Figura 6-7. Resultados Validación. Caudales medios mensuales.....	39
Figura 6-8. Hidrograma Período Completo.....	40
Figura 6-9. Curva Duración Período de estudio 1982-2010.....	40
Figura 6-10. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados, período de estudio 1982-2010.....	40
Figura 6-11. Ajuste Caudales máximos anuales nivales. Período 1982-2010.....	41
Figura 6-12. Ajuste Caudales máximos anuales pluviales. Período 1982-2010.....	41
Figura 6-13. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período nival, Línea Base.....	43
Figura 6-14. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período pluvial, Línea Base.....	43
Figura 7-1. Extracción Variables modelo PRECIS.....	45
Figura 7-2. Resultado Escalamiento de datos meteorológicos. Período 1982-2010.....	45
Figura 7-3. Resultados Futuros.....	46
Figura 7-4. Curva de Duración Futuro Maipo en San Alfonso.....	47

---

Figura 7-5. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período nival, Futuro (2040-2070). .....	48
Figura 7-6. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período pluvial, Futuro (2040-2070). .....	48
Figura 8-1. Punto de Control. ....	49
Figura 8-2. Correlaciones para obtener el caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano, período nival (1982-2010). ....	51
Figura 8-3. Correlaciones para obtener el caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano, período pluvial (1982-2010). ....	51
Figura 8-4. Correlación Maipo antes de Angostura versus Río Angostura. ....	54
Figura 9-1. Esquema Río HEC-RAS. ....	57
Figura 9-2. Creación área de inundación. ....	58
Figura 9-3 Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años régimen pluvial, línea base .....	60
Figura 9-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen nival, línea base .....	61
Figura 9-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen pluvial, línea base .....	62
Figura 9-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen nival, línea base. ....	63
Figura 9-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	64
Figura 9-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen nival, escenario futuro. ....	65
Figura 9-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	66
Figura 9-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen nival, escenario futuro. ....	67
Figura A-1. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen pluvial, escenario línea base. ....	72
Figura A-2. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen nival, escenario línea base. ....	73
Figura A-3. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen pluvial, escenario línea base. ....	74
Figura A-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen nival, escenario línea base. ....	75
Figura A-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen pluvial, escenario línea base. ....	76
Figura A-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen nival, escenario línea base. ....	77
Figura A-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen pluvial, escenario línea base. ....	78
Figura A-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen nival, escenario línea base. ....	79
Figura A-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen pluvial, escenario línea base. ....	80
Figura A-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen nival, escenario línea base. ....	81

Figura B-1. Mapa Área Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	82
Figura B-2. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen nival, escenario futuro. ....	83
Figura B-3. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	84
Figura B-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen nival, escenario futuro. ....	85
Figura B-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	86
Figura B-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen nival, escenario futuro. ....	87
Figura B-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	88
Figura B-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen nival, escenario futuro. ....	89
Figura B-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen pluvial, escenario futuro. ....	90
Figura B-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen nival, escenario futuro. ....	91

---

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Motivación

Durante el último siglo, se ha observado que las temperaturas en la superficie terrestre a nivel mundial han ido en aumento, afectando a gran parte del planeta, en especial a los continentes. Asimismo, las precipitaciones han sido menos frecuentes pero más intensas debido a la mayor nubosidad por el aumento de la evaporación de agua (IPCC, 2007). Estos fenómenos que se han estado produciendo hace ya más de 50 años, dan a entender un cambio en el sistema climático de La Tierra. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el término “Cambio Climático” se refiere a un cambio en el clima a través de la variación del valor medio o en la variabilidad de alguna propiedad y que perdura durante un período prolongado, generalmente decenios. Esta definición no genera distinción entre si la variabilidad es producida por fenómenos naturales o si es debido a la actividad humana (orígenes antropogénicos). Sin embargo, con un grado de confianza muy alto, las actividades humanas desde 1750 han producido un aumento de la temperatura (IPCC, 2007).

La disminución de la temperatura promedio mundial y de las precipitaciones en general producen grandes efectos, afectando a la salud pública en casos de plagas y enfermedades, los servicios sanitarios debido a las sequías (IPCC, 2007), y otra consecuencia no menos importante está relacionada con el aumento de crecidas de bajas probabilidades de excedencia, afectando la seguridad de obras debido a inundaciones o deslindes de cauces de ríos. Varios ejemplos son posibles rescatar en la literatura, como lo son las precipitaciones ocurridas en Junio-Julio de 2007 en Inglaterra (BBC, 2009). Otro caso es el desborde del río Misisipi, el cual sufrió dos inundaciones de períodos de retorno 500 años, en sólo 15 años, fenómeno que sólo tenía una probabilidad de 0.04% de ocurrencia (NWF, 2008), lo que demuestra el aumento en la frecuencia de estos eventos extremos.

Debido a esta serie de razones, surge la idea de analizar los efectos producidos por las variaciones de precipitaciones y temperaturas en el mediano plazo (2040-2070), determinadas por un modelo climático global (GCM), para poder realizar la estimación de los caudales a futuro y así poder estudiar y delimitar zonas de seguridad o de un plan regulador que contemple los riesgos asociados a crecidas de distintas probabilidades de excedencia en la comuna de Isla de Maipo, ubicada en la Región Metropolitana de Chile.

Esta comuna es predominantemente rural, y por ella pasa el Río Maipo. Su cercanía con la ciudad de Santiago, la disponibilidad de información detallada de la batimetría del cauce (A&C, 2009) y la gran cantidad de estaciones fluviométricas y meteorológicas en el sector son la base fundamental para poder realizar este estudio.

La metodología para realizar este trabajo es relativamente estándar con el fin de sentar las bases para la realización de estudios futuros similares en otras cuencas, expandiendo la información a más comunas, y que sirvan como apoyo en políticas públicas como por ejemplo para la realización de planes reguladores, entre otras.

### 1.2 Objetivos y Alcance



### 1.2.1 Objetivos generales

La idea principal de esta memoria es entregar información que pueda ser utilizada como antecedente para la realización o modificación de un futuro plan regulador de la comuna, a través de la identificación de zonas con riesgo de inundaciones o desbordes del Río Maipo, incorporando las variaciones en las precipitaciones y temperaturas debido al cambio climático en el mediano plazo (2040-2070).

Debido a la realización de mapas asociados a diferentes probabilidades de excedencia, esta memoria pretende generar la información necesaria para poder delimitar los encausamientos del río, y para generar medidas de control y prevención inundaciones.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Estimar crecidas en el río Maipo al llegar a la comuna de Isla de Maipo, para así poder realizar la proyección de dicho caudal hacia el futuro.
- ii. Calibrar y validar un modelo hidrológico a escala diaria, utilizando el software WEAP (Water Evaluation And Planning) en el sistema de estudio, generando series de caudales medios diarios, para distintos escenarios posibles en el mediano plazo, integrando la variable del cambio climático.
- iii. Realizar el escalamiento de los resultados de las proyecciones de temperatura y precipitaciones forzadas por el modelo climático global (GCM) ECHAM5, a través del modelo regional PRECIS, entregando series de precipitaciones y temperaturas futuras en el mediano plazo, para el sistema en estudio.
- iv. Obtener la serie de caudales máximos diarios anuales a partir de los caudales medios diarios proyectados para el mediano plazo, para tener la serie de caudales futuros que serán utilizados posteriormente para la generación de los mapas de inundación.
- v. Recopilar información acerca de la batimetría del Río Maipo en el área de interés, esto con el fin de generar posteriormente el cauce del Río en el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System).
- vi. Modelar el eje hidráulico a partir de los caudales de entrada para distintos períodos de retorno, y así poder determinar zonas de inundación a lo largo de la zona de interés.

### 1.2.3 Alcance

En la actualidad existen estudios que poseen mapas donde se delimita la zona de riesgo de inundación en la Comuna de Isla de Maipo. Sin embargo, en esta memoria se incorporará, como

ya se ha mencionado antes, la variable proporcionada por el cambio climático. Donde se espera que se produzca un incremento en las zonas con riesgo debido a un aumento en la frecuencia con la que ocurren las crecidas.

En esta memoria no se espera generar medidas de prevención en el manejo de eventos extremos ni ser una guía en caso de cómo mitigar una crecida que produzca daños en la infraestructura o urbanismo de la comuna. Más bien, sólo se desea generar información, a través de los mapas de inundación, sobre las posibles zonas afectadas por deslindes en el mediano plazo, para que sirvan como antecedentes para una mejor toma de decisiones, aumentando la seguridad de los sectores aledaños al Río Maipo.

### 1.3 Organización del Informe

En la primera parte de este estudio, se expone un análisis bibliográfico acerca del impacto del cambio climático en el entorno mundial, con especial énfasis en Chile. También se discuten las suposiciones realizadas para la modelación de los escenarios futuros y se analizan distintas posturas para abarcar el concepto de que las propiedades climáticas de la Tierra han estado cambiando.

Luego, se introduce el modelo hidrológico WEAP, el cual se utiliza en este estudio, explicando su metodología, la idealización del problema y los parámetros de entrada que éste necesita, y se discute brevemente los resultados que otros estudios han obtenido a través de este programa.

Posteriormente, corresponde el desarrollo del estudio, partiendo con la presentación de antecedentes para describir la cuenca y el sistema de estudio. Si bien es cierto que los mapas a generar son para la comuna de Isla de Maipo, el área de estudio es mucho más amplia, abarcando las cuencas cordilleranas delimitadas por las estaciones de salida Maipo en el Manzano y río Maipo en San Alfonso, ubicadas en la Región Metropolitana de Chile.

Seguidamente se expone la información hidrometeorológica disponible en el área de estudio. Los principales datos a recopilar son las precipitaciones, temperaturas y caudales diarios.

Con la información hidrometeorológica recopilada, se procede a confeccionar el modelo hidrológico utilizando el software WEAP. En esta parte del informe, se presentan las variables a calibrar junto con el resultado de esta calibración. Además se realiza la validación del modelo, para su posterior proyección.

Los capítulos 2 y 3 establecen la fundamentación teórica del problema y los capítulos 4 y 5, las características del sistema a estudiar además de entregar información de entrada para el modelo.

El capítulo siguiente trata de la modelación hidrológica de la cuenca controlada por la estación fluviométrica Maipo en San Alfonso a escala diaria, este proceso consta de dos etapas, la calibración y validación del modelo, donde se incorpora toda la información obtenida anteriormente para poder representar de mejor manera la cuenca y evitar así mayor espacio para supuestos.

Luego, se obtienen las series estadísticas de precipitación y temperatura para el mediano plazo, generadas por el escalamiento que realiza el modelo DGF-PRECIS, del Departamento de Geofísica. Junto con esto se presentan la serie de caudales futuros proyectados.

Seguidamente se explica la metodología para obtener los caudales en el punto de interés. Aquí, se realiza una serie de correlaciones para obtener el caudal máximo instantáneo tanto en régimen pluvial como nival, para distintos períodos de retorno.

Por último, se explica a grandes rasgos el procedimiento para la obtención de los mapas de inundación, junto con la discusión que pueda surgir en referencia a la incorporación de la variable del cambio climático en la modelación del sistema hidrológico en el mediano plazo.

Por último, se expone las recomendaciones obtenidas producto del desarrollo de la memoria, y que de alguna manera hubieran podido mejorar o facilitar la realización de este estudio, con el objeto de dar una mejor claridad y apoyo para quienes deseen hacer trabajos similares.

## CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

La Tierra absorbe la radiación proveniente del Sol, principalmente en su superficie. Esta energía es luego redistribuida por las circulaciones atmosféricas y del océano hacia el espacio. Considerando la Tierra como un *sistema*, la radiación solar entrante es balanceada aproximadamente con la radiación solar reflejada más la radiación de baja frecuencia saliente. Cualquier factor que pueda alterar este equilibrio en la radiación puede afectar el clima.

El efecto invernadero es producido por la existencia de ciertos gases en la atmósfera capaces de retener gran parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra, reenviándola a la superficie y por ende calentándola. De esta manera, un incremento en las concentraciones de estos gases invernaderos aumentará la retención de esta radiación, produciendo un cambio en el equilibrio térmico de la Tierra, que tiende a calentar la superficie terrestre.

Debido a este fenómeno es que hoy en día existe un gran consenso científico en que el clima global se verá alterado notoriamente en el siglo XXI, como resultado del aumento de concentraciones de estos gases de efecto invernadero tales como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos. A este aumento en las temperaturas en la superficie terrestre producto de la emisión de los gases de efecto invernadero se le denomina Calentamiento Global. Este fenómeno genera una serie de variaciones, por ejemplo en las precipitaciones anuales, que tienden a disminuir, así mismo con la cobertura de nieve, y el nivel del mar, que tiende a aumentar (IPCC, 2007).

El Calentamiento Global, como fenómeno climatológico es un tema recurrente y bastante estudiado a nivel mundial, donde existen un número importante de modelos climáticos, basados en leyes físicas, como la conservación de la masa, la conservación de la energía y la conservación del momento, que a través de una grilla tridimensional, son resueltos matemáticamente. Actualmente, se utilizan Modelos de Circulación Global (MCG), los cuales acoplan la circulación atmosférica y oceánica. Estos modelos a través de la parametrización de los procesos físicos que intervienen en el clima, realizan simulaciones numéricas computacionales que entregan como resultado series de tiempo de las distintas variables climáticas (temperatura, precipitación, radiación, humedad, etc.). Debido a la poca resolución espacial (centenares de kilómetros) que poseen los MCG, sobre todo en zonas costeras y con mucho relieve como es el caso de Chile, es necesario recurrir a Modelos Regionales del Clima (RCMs) en los cuales el dominio de cálculo corresponde a sólo una parte de la superficie terrestre, con lo cual puede ser descrita con mejor resolución (50, 25 km o menos).

En este estudio se utilizarán los resultados obtenidos por el modelo PRECIS-DGF, el cual es un modelo RCM, que está integrado en una grilla con espaciamiento de 25 km, cubriendo Chile continental. El modelo fue forzado en sus bordes por el MCG, ECHAM5 elaborado por el Instituto para la Meteorología Max-Planck.

Por otra parte, para determinar el grado de incidencia que tienen los efectos antropogénicos en las proyecciones de las variables climáticas se debe hacer algunas suposiciones en las emisiones de los gases de efecto invernadero, con el fin de forzar la simulación a un *escenario* posible. Es así como surgen distintas familias de escenarios posibles, los cuales comprenden una línea evolutiva similar en lo que respecta a sus características demográficas, sociales, económicas, y de cambio tecnológico y está constituido de cuatro grupos: A1, B1, A2 y B2.

- I. A1. La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad de siglo y disminuye posteriormente, produciéndose una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficientes. Prevalcen la interacción cultural y social entre las regiones, y se produce una importante reducción en las diferencias regionales de los ingresos per cápita. Esta familia se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio climático tecnológico en el sistema energético. Los tres grupos A1 se distinguen por su énfasis tecnológico: fuentes de energía intensivas de origen fósil A1FI, fuentes predominantemente de origen no fósil (A1T) o un equilibrio entre todas las fuentes A1B (el equilibrio se define como la no dependencia excesiva de una fuente de energía concreta, suponiendo que se apliquen ritmos similares de mejoras en todas las formas de aprovisionamiento energético y en las tecnologías de uso final).
- II. A2. La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. La cuestión subyacente es la autosuficiencia y preservación de las identidades locales. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- III. B1. La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcanza su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad.
- IV. B2. La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados

En la Figura 2-1 se presenta una ilustración de los escenarios del SRES (Special Report Emissions Scenarios). En total son 40 escenarios que se han desarrollado, todos igualmente válidos ya que no tienen una probabilidad de ocurrencia asignada. Algunos escenarios poseen supuestos “armonizados” en la población global, y en el producto interno bruto, los cuales poseen la sigla “HS” (harmonized scenarios). Por otra parte, otros escenarios exploran incertezas en las fuerzas forzantes más allá de los escenarios armonizados, éstos llevan una sigla “OS”.

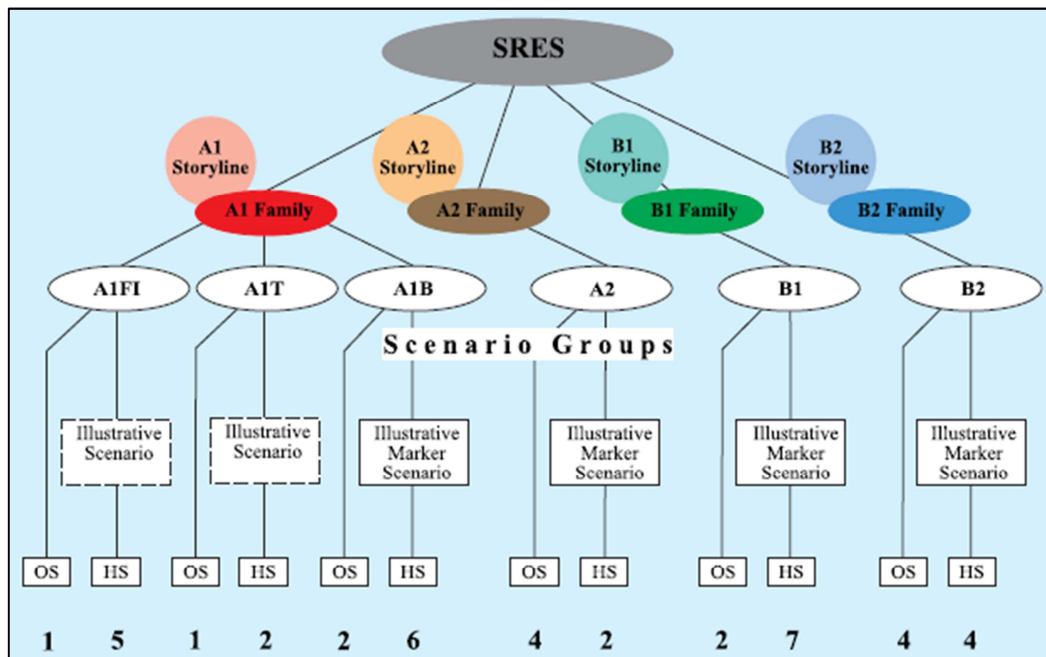


Figura 2-1. Línea evolutiva de las familias de escenarios

En este estudio, se abordará el escenario SRA1B, el cual supone un mundo con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su máximo a mitad del siglo XXI para luego declinar. Se introducen rápidamente nuevas y más eficientes energías. Se produce un balance entre las fuentes de energía.

Como se dijo en el capítulo anterior, una de las mayores consecuencias que trae el Calentamiento Global es el aumento, en la intensidad de las precipitaciones diarias, aumentando así la probabilidad de ocurrencia de crecidas con mayor período de retorno. De esta manera, evaluar las zonas con peligro de inundación es un apoyo fundamental para el desarrollo y planificación del crecimiento de ciudades o pueblos. A menudo en la literatura es posible encontrar información e investigaciones relacionadas o al calentamiento global, o al estudio del manejo o gestión del riesgo de inundación de alguna ciudad en particular. Sin embargo, pocas son las investigaciones donde en realidad se analiza la proyección en la vulnerabilidad de inundación a futuro.

Para hablar de “zonas de inundación” hay que primero definir o identificar los conceptos de riesgo e inundación. El concepto de ‘riesgo’ representa una categoría matemática que incluye la probabilidad de ocurrencia de un evento desfavorable y de la cuantificación del daño que genera. El concepto de ‘inundación’ en cambio, es el aumento en el nivel de un cauce, bajo el cual objetos existían normalmente en condiciones normales. En este trabajo se estudiará la variación en las zonas de inundaciones provocadas por las crecidas en ríos, en el mediano y largo plazo debido al calentamiento global.

Algunos ejemplos de este efecto del cambio climático se pueden mencionar, como por ejemplo:

En el Río Teno (Región del Maule, Chile), los caudales bajarían en un 30% para el período 2036-2065 y un 40% para el período 2071-2100, y sería originada principalmente por una disminución de la precipitación en un 26% y 35% y a un aumento en las temperaturas anuales cerca de 0.5°C y 1.3°C para cada período respectivamente (Mena, 2009).

Mirza (2001) ha realizado un estudio relacionado con el calentamiento global y el cambio en la probabilidad de ocurrencia en inundaciones en Bangladesh y sus implicancias. Este estudio analiza las tres cuencas más grandes de esa ciudad, la cual posee inundaciones todos los años debido a su topografía plana y que apenas está a 6 m.s.n.m. Si bien el enfoque de la investigación está asociado al daño que causarían estas inundaciones a la agricultura, lo más importante es cómo la probabilidad de excedencia de ciertos eventos cambia de manera asombrosa, todo debido al calentamiento global. Por ejemplo, para variaciones de 2°C en la temperatura, la probabilidad de excedencia de una inundación puede pasar de .05 a .12 %. En otras palabras, la magnitud de la inundación podría ser 2.5 veces más probable de ocurrir que en el presente. También cambiaría el tiempo donde se presentaría la descarga peak de la cuenca, lo cual también podría generar alteraciones en la cuenca. Cabe mencionar que este cambio en las probabilidades de excedencia afecta directamente a la gestión del riesgo de inundación, donde actualmente se toman medidas construyendo obras o bien analizando crecidas de probabilidades menores.

Otro estudio realizado en los Alpes Suizos demostró que las inundaciones durante este último siglo han aumentado significativamente, donde las crecidas con período de retorno 100 años serán 5 veces más probables (Allamano et al., 2009)

Si bien los dos ejemplos anteriores no hablan específicamente de Chile, lo que se desea es demostrar que es esperable un aumento en la probabilidad con la que ocurren las crecidas asociadas a períodos de retorno de 100 años o más.

Por otra parte, para el manejo de datos, particularmente, en la hidrología es fundamental tener un abanico de programas que permitan desarrollar el trabajo y obtener resultados de manera sencilla y que sean capaces de presentarlos en forma atractiva para su interpretación por parte del especialista. Para este estudio en particular, contar con programas de manejo de crecidas y de Sistema de Información Geográfica (GIS) es fundamental para generar resultados que sean entendibles y legibles para otros receptores que no necesariamente tienen que ser entendidos en la materia. Para el estudio de zonas de inundación se hace fundamental la generación de mapas de vulnerabilidad, que estén georeferenciados y que muestren de forma clara el área de inundación que pudiese existir en dichas zonas.

Por último, a través del acoplamiento entre la modelación del eje hidráulico y un programa de Sistema de Información Geográfico, es posible obtener como resultado mapas que demuestren o ratifiquen algún aumento de la vulnerabilidad de zonas aledañas al Río Maipo en la comuna de Isla de Maipo.

### CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO DEL MODELO HIDROLÓGICO

Para realizar la modelación hidrológica, se utilizará el software computacional WEAP (Water Evaluation And Planning), desarrollado por el Stockholm Environmental Institute con el apoyo del Centro de Ingeniería Hidrológica del US Army Corps of Engineers. Esta herramienta está enfocada en la planificación integrada de recursos hídricos, debido a las crecientes preocupaciones con respecto a la calidad ambiental, la incertidumbre del clima y la necesidad de crear medidas sustentables para el manejo del recurso hídrico, pudiendo abarcar distintos problemas como por ejemplo sistemas de riego, hidroeléctricos o de abastecimiento de agua potable.

La particularidad que posee este programa, es la capacidad de analizar distintos escenarios posibles, evaluando así los eventuales impactos que pudiesen provocar algún cambio en las restricciones o variables en la modelación. Por esta razón, WEAP surge como una real alternativa para poder introducir la variable proporcionada por el cambio climático a la modelación hidrológica. Un esquema gráfico de cómo funciona este modelo se presenta en la Figura 3-1.

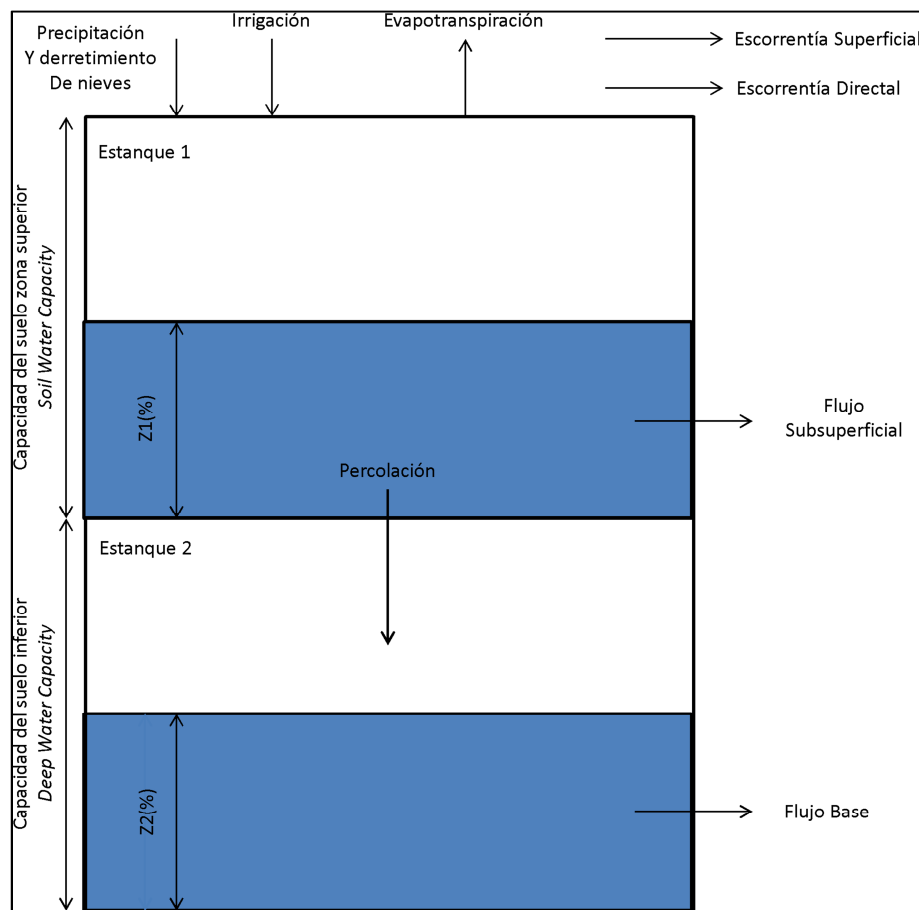


Figura 3-1. Esquema Gráfico Modelo WEAP

A través de un balance de masas entre los dos estanques unidos verticalmente, es posible determinar las distintas componentes de los flujos subterráneos y superficiales.



A partir de datos meteorológicos, WEAP posee tres maneras de simular la escorrentía. Las cuales son:

- Precipitación/Escorrentía.
- Demanda de riego.
- Humedad del suelo.

La manera con la que se determina la escorrentía de la cuenca, es a través del método de Humedad del Suelo, mediante una función de transferencia en la que se determina una variable de salida (el caudal), a partir de variables meteorológicas de entrada (precipitación y temperatura). En el algoritmo del programa se calibran una gran cantidad de parámetros para representar el fenómeno físico. En las Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se presenta una descripción general de las variables y parámetros, divididos entre parámetros de terreno y meteorológicos que el programa emplea para la generación de series de tiempo de caudales.

Existen diversos parámetros que pueden ser omitidos si es que no existe información relevante en la cuenca. Un problema bastante recurrente surge cuando se desea modelar alguna cuenca cordillerana, carente de intervención humana, ya que generalmente poseen terrenos inhóspitos, lo que dificulta la colocación de estaciones meteorológicas que midan las variables del clima, provocando así un vacío a la hora de ingresar estos parámetros al modelo.

Un tema muy importante es la validez que tienen las magnitudes de los valores que tienen los parámetros a calibrar. Idealmente, se supone que los valores iniciales que se ingresan al modelo son representativos (o medianamente representativos) de las distintas características de la cuenca, ya sea morfológica, climática, de aguas subterráneas, etc. Sin embargo, con el fin de encontrar o mejorar la simulación de la escorrentía, el modelo puede ir modificando estos valores, dando como resultado parámetros no representativos de la realidad. Esto es particularmente importante con la evapotranspiración ya que simulaciones correctas de caudal podrían estar basadas en valores erróneos en la evaporación.

**Tabla 3.1. Parámetros de suelo y terreno de WEAP**

Nombre Parámetro	Abreviación	Traducción	Unidades	Descripción
Área	Área	Área	km <sup>2</sup>	Área de cada <i>catchment</i> . En este caso se trata del área asociada a cada banda de elevación.
Kc	Kc	Coefficiente de cultivo	-	Coefficiente de cultivo utilizado por la FAO para calcular la evapotranspiración.
Soil Water Capacity	SWC	Capacidad de la capa superior de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la primera capa de suelo.
Deep Water Capacity	DWC	Capacidad de la capa profunda de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la capa de suelo profunda.
Runoff Resistance	RORF	Factor de resistencia a la escorrentía	-	Factor que controla la respuesta de la escorrentía, relacionado con la superficie del suelo.
Root Zone Conductivity	RZC	Conductividad de la capa superior del suelo	mm/día	Conductividad hidráulica de la capa superior del suelo.
Deep Conductivity	Dwcon	Conductividad de la capa profunda del suelo	mm/día	Conductividad hidráulica de la capa inferior del suelo.
Preferred flow direction	PFD	Dirección Preferencial del Flujo	%	Factor que divide el flujo que va desde la capa superior de suelo hacia la capa inferior.
Initial Z1	z1	Z1 Inicial	%	Porcentaje de humedad con que la capa superior de suelo inicia la simulación.
Initial Z2	z2	Z2 Inicial	%	Porcentaje de humedad con que la capa inferior de suelo inicia la simulación.

**Tabla 3.2. Parámetros meteorológicos y climatológicos de WEAP**

Nombre Parámetro	Abreviación	Traducción	Unidades	Descripción
Precipitation	-	Precipitación	mm/día	Precipitación que cae sobre cada área.
Temperature	-	Temperatura	°C	Temperatura media registrada en cada área.
Humidity	Humedad	Humedad	%	Humedad relativa registrada en cada área.
Wind	Wind	Viento	m/s	Velocidad media del viento registrada en cada área.
Cloudiness fraction	-	Fracción del cielo cubierto por nubes	%	Fracción del cielo cubierto en cada área.
Latitude	-	Latitud	°	Latitud de la zona de estudio.
Initial Snow	-	Nieve inicial	mm equivalente en agua	Nieve inicial observada en cada área.
Albedo Data	-	Datos de albedo	-	Albedo observado en cada área.
Albedo Lower Bound	Albedo low	Límite inferior de albedo	-	Albedo para nieve antigua o sucia.
Albedo Upper Bound	Albedo high	Límite superior de albedo	-	Albedo para nieve nueva o fresca.
Rnet Other	RnetO	Rnet otros	MJ/m <sup>2</sup>	Radiación que se suma a la radiación solar incidente.
Melting Point	MeltP1	Temperatura de derretimiento	°C	Temperatura de derretimiento del agua.
Freezing Point	FreezP1	Temperatura de congelamiento	°C	Temperatura de congelación del agua.
Snow accumulation gauge	-	Medición de nieve o ruta de nieve	mm equivalente en agua	Registro de acumulación de nieve para cada cuenca.

Para comenzar la simulación hidrológica, primero se debe esquematizar la cuenca en estudio, definiendo los siguientes elementos:

- i. Río: Constituye el elemento fundamental de la cuenca que se quiere modelar.
- ii. *Catchments*: Elementos que representan una porción de área de la cuenca. Para esta modelación en particular se discretizó la cuenca en 10 *catchments* o bandas de elevación de igual área.
- iii. Estación Fluviométrica: Este elemento generalmente se ubica al final del tramo de interés, donde se puede tener la comparación entre los caudales observados y simulados.
- iv. Otros Elementos: Para modelar cuencas que tengan derechos de agua, otro tipo de demandas o embalses, basta con incorporar estos elementos dentro del esquema general. Para esta memoria, se considerará el Embalse el Yeso, ubicado dentro de la cuenca.

En la Figura 3-2 se pueden apreciar los elementos mencionados anteriormente insertos en la cuenca delimitada por la estación Río Maipo en San Alfonso y que serán utilizados en este trabajo.

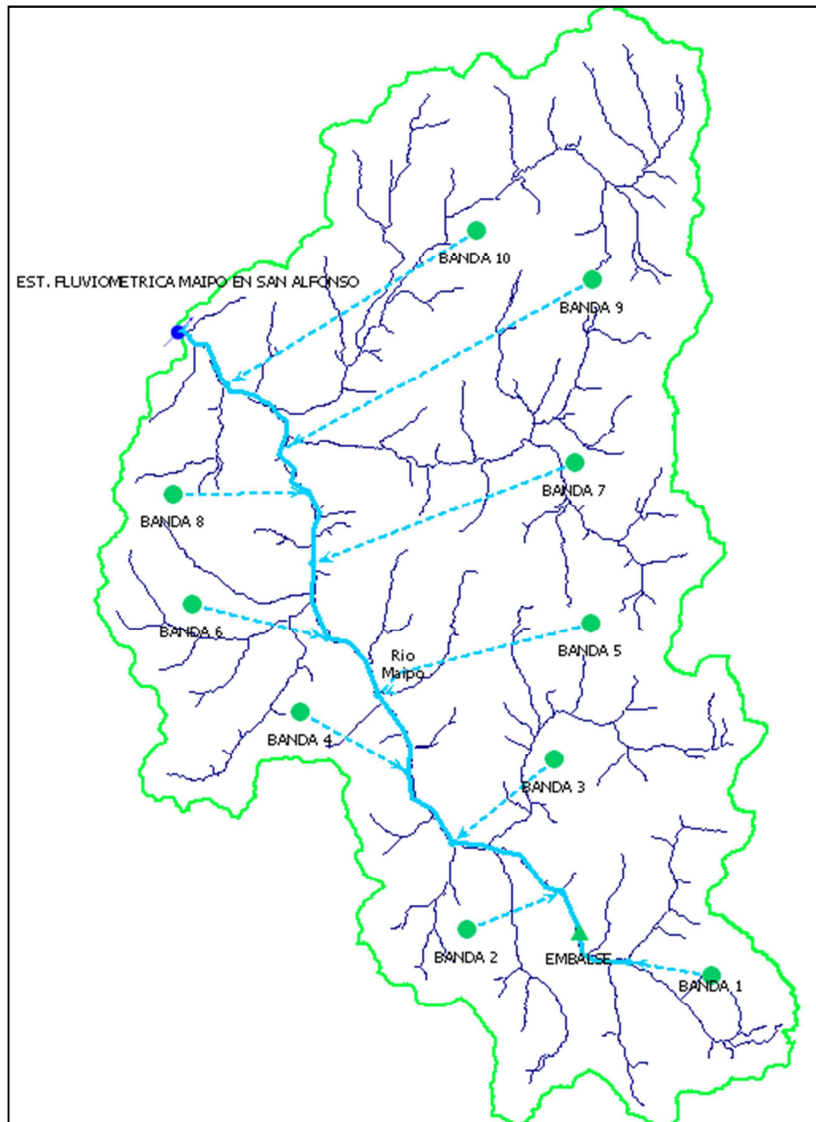


Figura 3-2. Esquema de modelación en WEAP

En cuencas cordilleranas, determinar la fracción de nieve derretida y nieve acumulada es de vital importancia. Para esto, WEAP contempla dos parámetros capaces de ser calibrados denominados temperatura de congelamiento ( $T_c$ ) y derretimiento ( $T_d$ ). Teóricamente ambas temperaturas corresponden a los  $0^\circ\text{C}$ , pero dada la incertidumbre en las variables medidas, además de las suposiciones básicas que todo modelo genera, como asumir que el gradiente térmico es lineal, y decreciente con la altura hacen que estas temperaturas estén en un rango de  $-5$  a  $15^\circ\text{C}$  para una modelación a nivel diario.

Los coeficientes de derretimiento y congelamiento determinan la porción de agua líquida y sólida en la precipitación y la fracción de cobertura nival que se derrite en cada paso de tiempo. Este fenómeno se explica a continuación:

$$P_e = m_i + P_p * m_c$$

Ecuación 3-1

$m_i$  y  $m_c$  son términos que corresponden al derretimiento de nieve, y se calculan como sigue:

$$m_c = \begin{cases} 0 & T_i < T_c \\ 1 & T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_c}{T_d - T_c} & T_c < T_i < T_d \end{cases} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

$$m_i = \min(AC_i * m_c, Em) \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Donde  $Em$  es la energía disponible para derretimiento convertida en un equivalente profundidad/tiempo. La energía disponible para el derretimiento se define como

$$Em = Rnet + Eother \quad \text{Ecuación 3-4}$$

$Eother$  representa parámetros energéticos agrupados en un solo término (Young et al, 2009) y  $Rnet$  representa la radiación neta sobre los catchment de acuerdo a la latitud y al día del año, la cual es automáticamente calculada por el modelo. Para la realización de la modelación hidrológica se calibra  $Eother$  de la siguiente forma:

$$Eother = RnetO * (Cloudiness Fraction) \quad \text{Ecuación 3-5}$$

Donde  $RnetO$  es un ponderador a calibrar y  $Cloudiness Fraction$  corresponde a las horas del día libre de nubes, 0 completamente nublado y 1 totalmente despejado.

$$AC_i = AC_{i-1} + (1 - m_i) * P_i - m_{i-1} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

$AC_i$  = acumulación en el período de tiempo  $i$  en altura equivalente en agua

La escorrentía superficial ocurre a partir de la precipitación efectiva y la irrigación, la cual se desprecia en este trabajo, y depende de la humedad que tenga la capa superior de suelo. La escorrentía directa ocurre cuando se sobrepasa el 100% de humedad en la capa superior del suelo.

$$\text{Escorrentía Superficial} = (\text{Precipitación Efectiva} + \text{Irrigación}) * z_1^{RORF} \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Escorrentía Directa Ocorre sólo si  $z_1 > 100\%$

El flujo subsuperficial se calcula como el cuadrado de la humedad de la capa superior del suelo multiplicado por la conductividad de dicha capa ( $RZC$ ) y por el porcentaje del flujo que se queda en la capa superior ( $PFD$ ).

$$\text{Flujo Subsuperficial} = (RZC * PFD) * z_1^2 \quad \text{Ecuación 3-8}$$

La percolación desde la primera capa de suelo a la capa inferior se calcula a partir de la conductividad de la primera y el porcentaje de flujo que va hacia la capa inferior.

$$\text{Percolación} = (RZC * (1 - PFD)) * z_1^2 \quad \text{Ecuación 3-9}$$

El flujo se calcula como la conductividad de la capa inferior de suelo multiplicada por el porcentaje de humedad de dicha capa.

$$\mathbf{Flujo\ Base = DC * z_2^2}$$

*Ecuación 3-10*

La evapotranspiración en el modelo es calculada como sigue.

$$\mathbf{ET = ET_o * (5 * z_1 - 2 * z_1^2) / 3}$$

*Ecuación 3-11*

Donde ( $ET_o$ ) se realiza mediante la aplicación del método Penman-Monteith.

$$\mathbf{ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}}$$

*Ecuación 3-12*

Donde:

$ET_o$ : Evapotranspiración de referencia.

$R_n$ : Radiación Neta.

$G$ : Densidad de flujo de calor del suelo.

$T$ : Temperatura media diaria.

$u_2$ : Velocidad del viento a dos metros sobre el suelo.

$e_s$ : Presión de saturación de vapor de agua.

$e_a$ : Presión de vapor.

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor.

$\gamma$ : Constante psicométrica.

## CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para proyectar los caudales medios diarios que escurren por el río Maipo, se adopta como punto de referencia los caudales disponibles en la cuenca delimitada por la estación fluviométrica “Río Maipo en el Manzano”. Para esto, se realiza la modelación hidrológica de la cuenca delimitada por la estación fluviométrica “Río Maipo en San Alfonso”, la cual es una cuenca cordillerana, bastante estudiada y posteriormente, mediante una correlación se determina el caudal en el punto de estudio. Isla de Maipo se encuentra aguas abajo de la cuenca Río Maipo en El Manzano, por esto, una vez realizada la proyección de caudales en la cuenca, se realiza una transposición de caudales hacia un “Punto de Control”, el cual tiene los caudales de entrada para la modelación en HEC-RAS. En la Figura 4-1 se puede apreciar la comuna de Isla de Maipo y la cuenca a modelar (delimitada por la estación Maipo en San Alfonso).

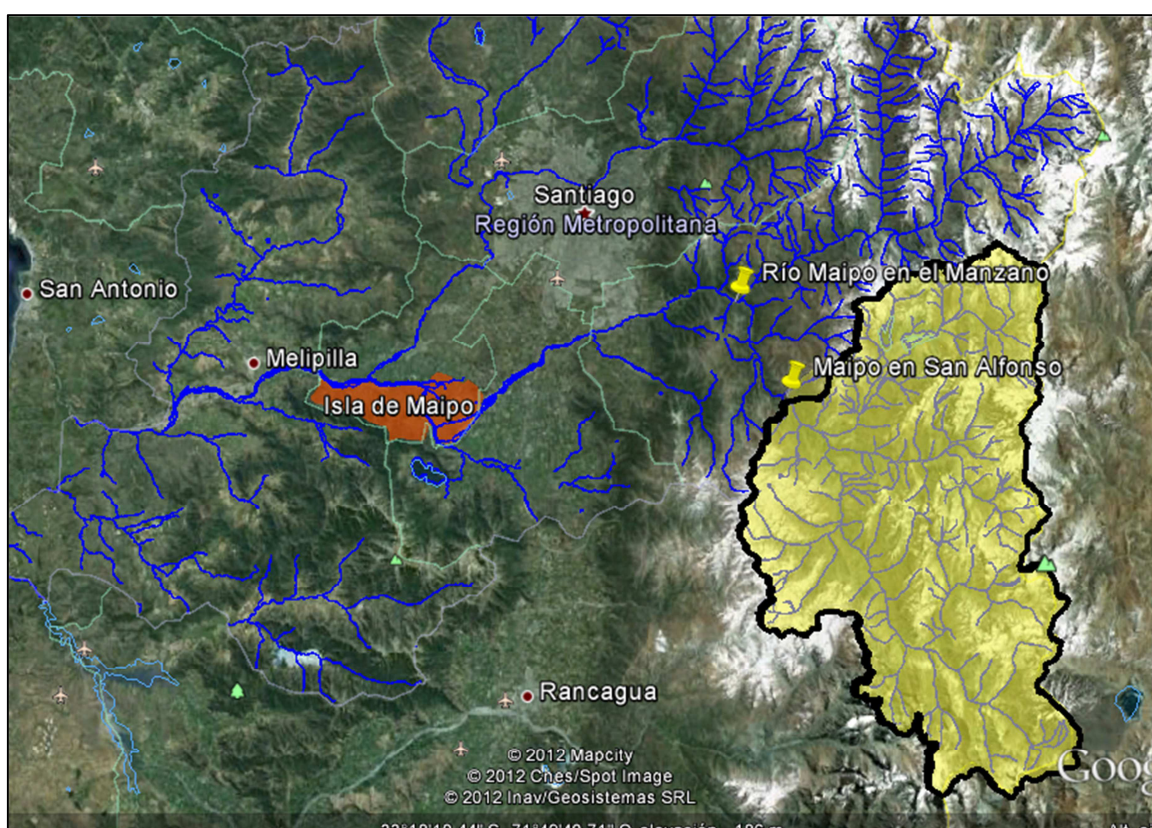


Figura 4-1. Sistema de Estudio

Para caracterizar la zona, primero se describe la cuenca en estudio, su vegetación, clima y uso de suelo, para posteriormente describir la comuna de Isla de Maipo, donde se realizan los mapas de riesgo de inundación.



#### 4.1 Descripción Cuenca Maipo en San Alfonso

La cuenca Río Maipo en San Alfonso está ubicada entre las latitudes  $33^{\circ} 29''$  a  $34^{\circ} 20''$  (Lat. Sur) y entre las longitudes  $70^{\circ} 23''$  a  $69^{\circ} 47''$  (Long. Oeste). El punto de salida de la cuenca está ubicado en las coordenadas  $33^{\circ} 44' 9''$  (Lat. Sur) y  $70^{\circ} 18' 8''$  (Long. Oeste), correspondiente a la estación fluviométrica Río Maipo en San Alfonso. Está ubicado al norte del poblado “El Ingenio” y al Sur Este de “San Alfonso” en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana. El área de la cuenca fue delimitada utilizando el software WMS, junto con los DEMs obtenidos desde el USGS, y su valor es de  $2804 \text{ km}^2$ . En la Figura 4-2 se puede apreciar la ubicación de la cuenca dentro de la Región Metropolitana.

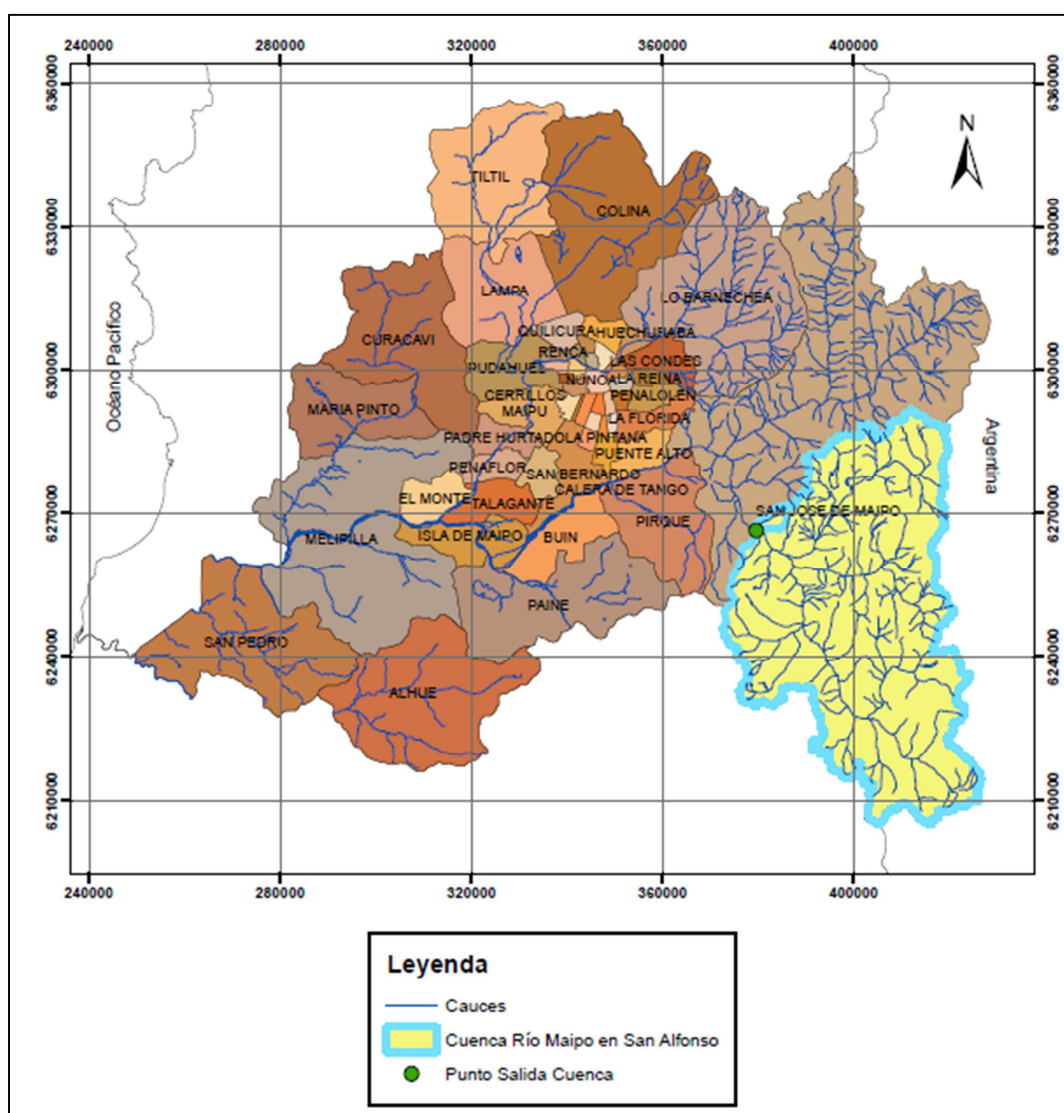


Figura 4-2. Ubicación Cuenca controlada por la estación Maipo en San Alfonso.

Para realizar la modelación hidrológica, es necesario discretizar el área total de la cuenca en los anteriormente mencionados *catchments*, o bandas de elevación. Para esto se utilizó el programa ArcGis, con el cual se dividió la cuenca en 10 bandas de igual área. Este proceso es fundamental para realizar la modelación ya que el área se utiliza para el cálculo de caudal en cada banda.

Para este proceso se utilizaron las curvas de nivel de la zona en formato *shapefile* y la delimitación de la cuenca propiamente tal. En la Figura 4-3 se presentan las bandas de elevación delimitadas y en la Tabla 4.1 la elevación media y el área de cada una. Esta información es relevante para obtener la precipitación y temperatura en cada una de estas bandas a través de los gradientes de precipitación y temperatura.

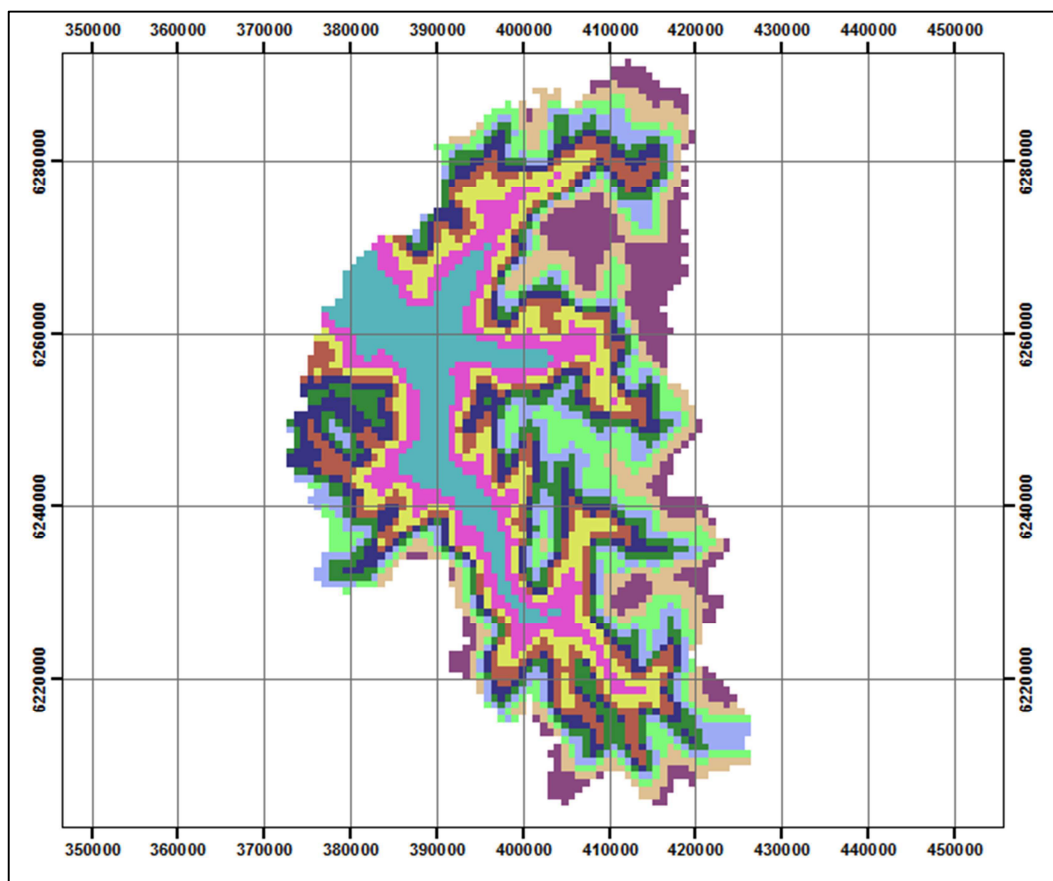


Figura 4-3. Bandas de Elevación cuenca delimitada por Maipo en San Alfonso.

Tabla 4.1. Elevación Media Bandas de Elevación Maipo en San Alfonso

Bandas Maipo en San Alfonso										
Banda	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Elevación media (m.s.n.m)	1.600	2.200	2.600	2.900	3.100	3.300	3.500	3.700	3.900	4.450
Área (Km <sup>2</sup> )	421	419	425	423	422	416	422	416	422	413

El clima de la cuenca puede caracterizarse, como un clima frío de altura, localizado en la Cordillera de Los Andes por sobre los 3.000 metros de altura. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas caracterizan este tipo de clima, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de alta cordillera (CADE-IDEPE, 2004). Los distritos agroclimáticos de la zona de la cuenca se presentan en la Tabla 4.2 y su distribución espacial en la Figura 4-4.



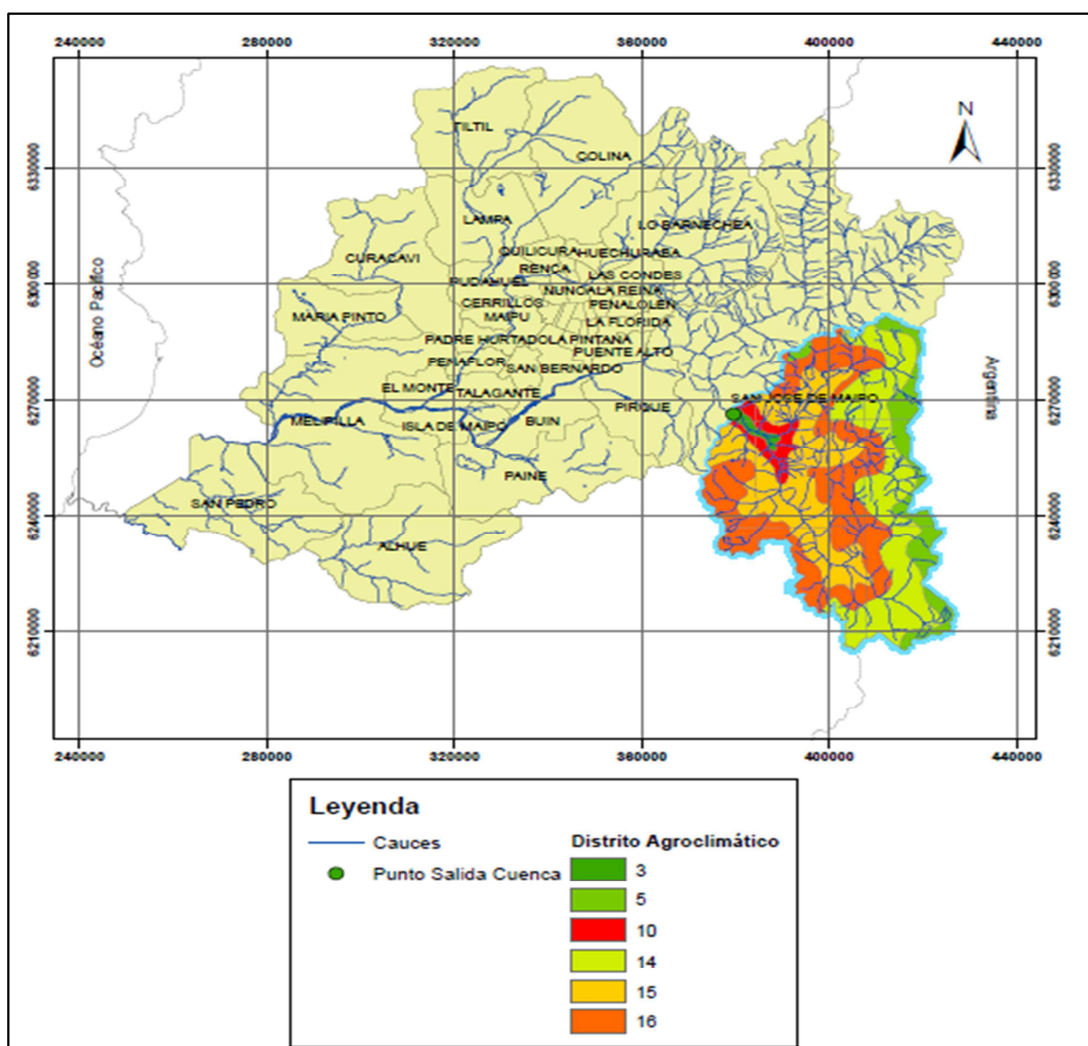


Figura 4-4. Distritos Agroclimáticos cuenca Maipo en San Alfonso.

El cauce principal corresponde al Río Maipo, el cual posee una longitud de 250 Km (de nacimiento a desembocadura) y es la principal fuente de agua de la Región. El río nace en la laguna Nacimiento, en los faldeos del Volcán Maipo, posee dos grandes tributarios antes del punto de salida, los ríos Volcán y Yeso. En la Figura 4-5 se puede apreciar los afluentes al cauce de estudio.

Tabla 4.2. Valores Agroclimáticos cuenca Maipo en San Alfonso.

Distrito Agroclimático	Temperatura máxima media anual [°C]	Temperatura mínima media anual [°C]	Temperatura media anual [°C]	Radiación Solar Directa media anual [W/m <sup>2</sup> ]	Evapotranspiración media anual [mm]	Precipitación Total anual [mm]
3	19.2	6.7	12.3	382.0	1176.0	655.9
5	1.3	-4.1	-1.3	352.0	810.0	1240.1
10	15.6	4.5	9.6	382.0	1140.0	838.9
14	3.0	-3.8	-0.4	352.0	834.0	1323.2
15	11.6	1.4	6.2	363.0	1038.0	1527.0
16	8.2	-1.1	3.4	359.0	966.0	1400.1

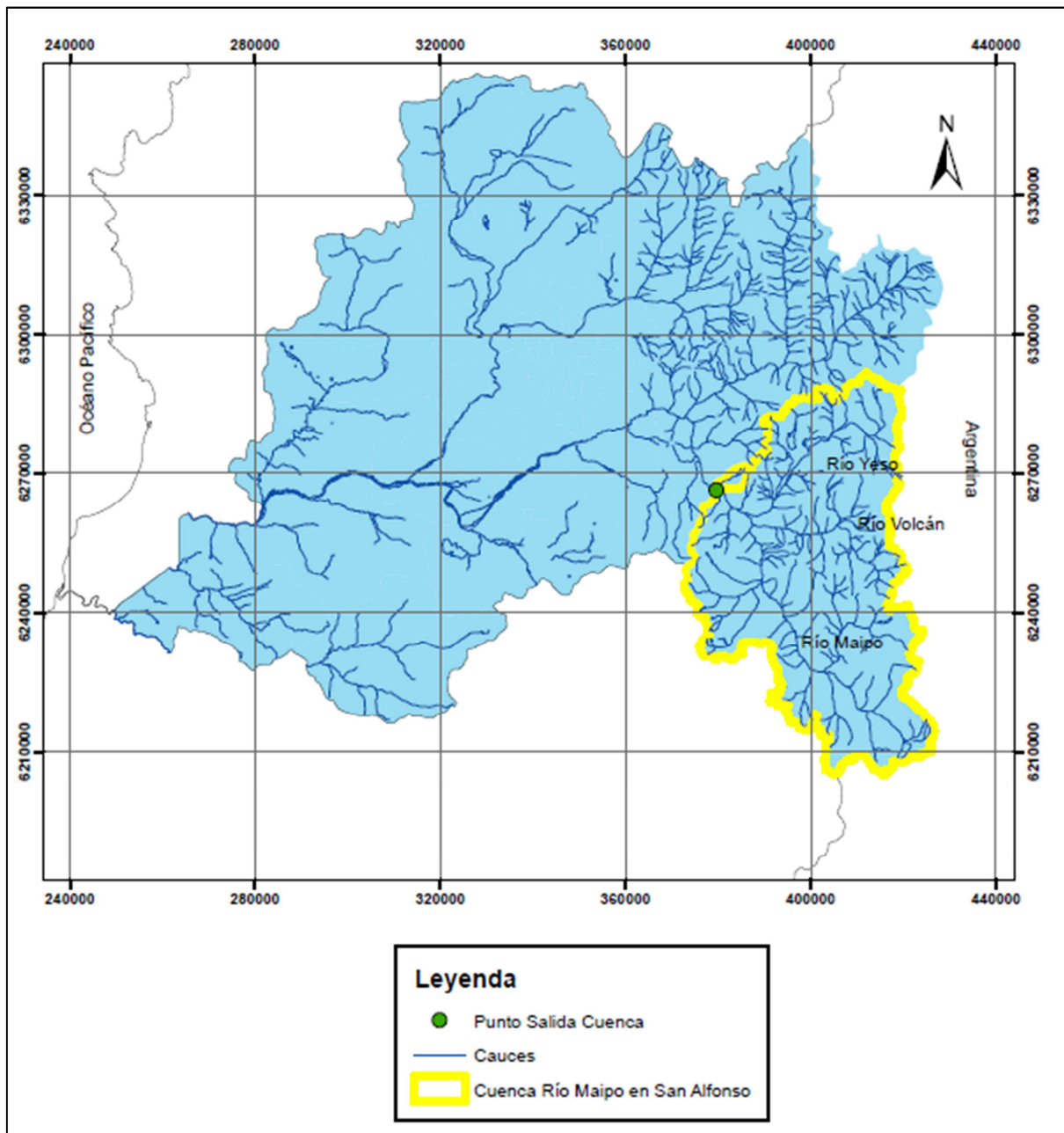


Figura 4-5. Principales Cauces cuenca Maipo en San Alfonso.

Con respecto al uso de suelo, en su mayor parte la cuenca puede clasificarse como desprovista de vegetación, sin embargo posee algunos terrenos con matorrales y praderas. Además hay presencia de glaciares y nieve en la parte alta de la cuenca. En la Figura 4-6 se puede apreciar las características espaciales del uso de suelo correspondiente a la cuenca en estudio, otras áreas de la Región Metropolitana se han dejado sin clasificación.

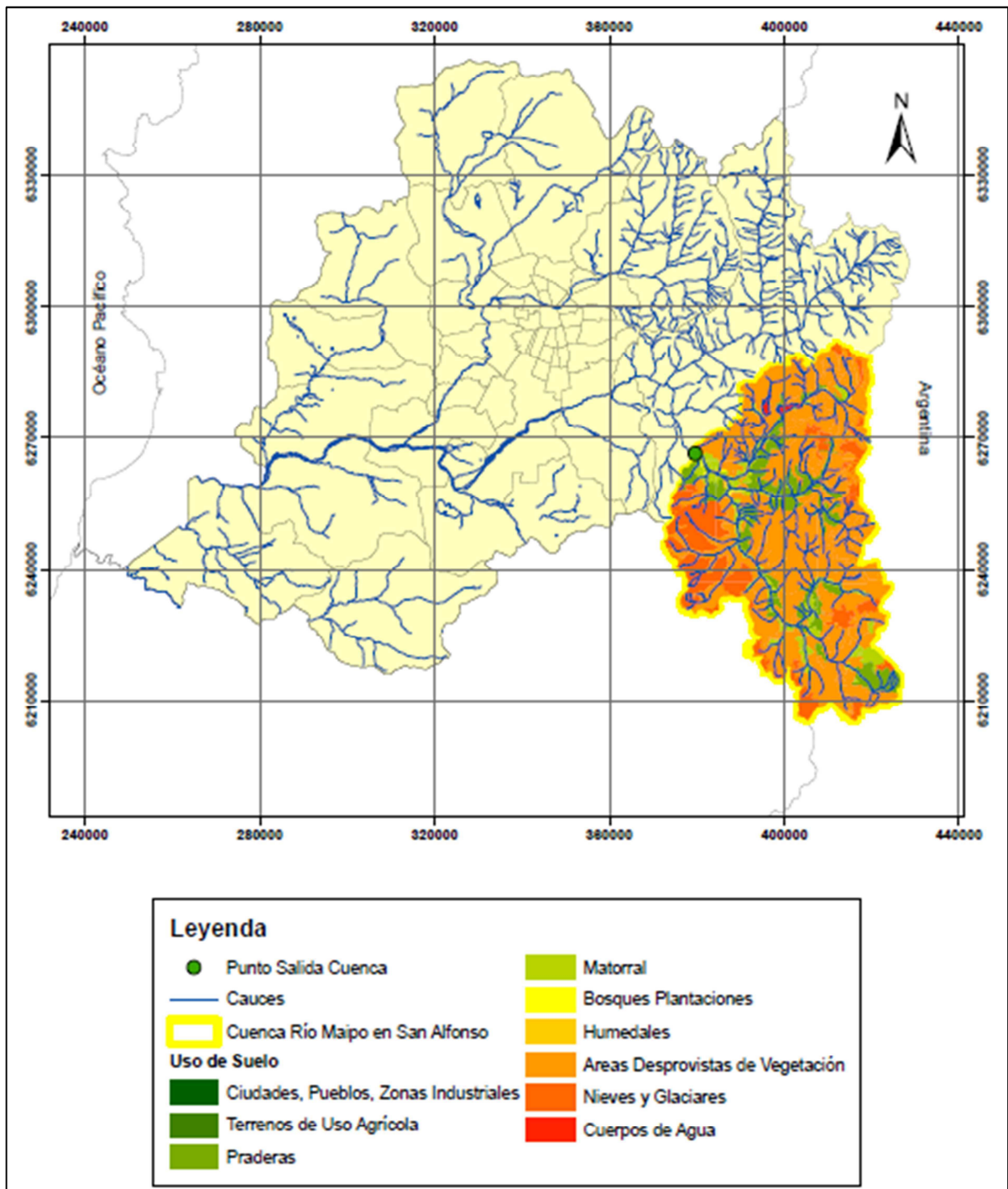


Figura 4-6. Uso de Suelo cuenca Maipo en San Alfonso.

El régimen de la cuenca es marcadamente nival, teniendo su peak en los meses de Enero y Febrero. Usando la información de caudales disponibles para la estación Río Maipo en San Alfonso se determinó la Curva de Variación Estacional, a nivel mensual para distintas probabilidades de excedencia (Figura 4-7).

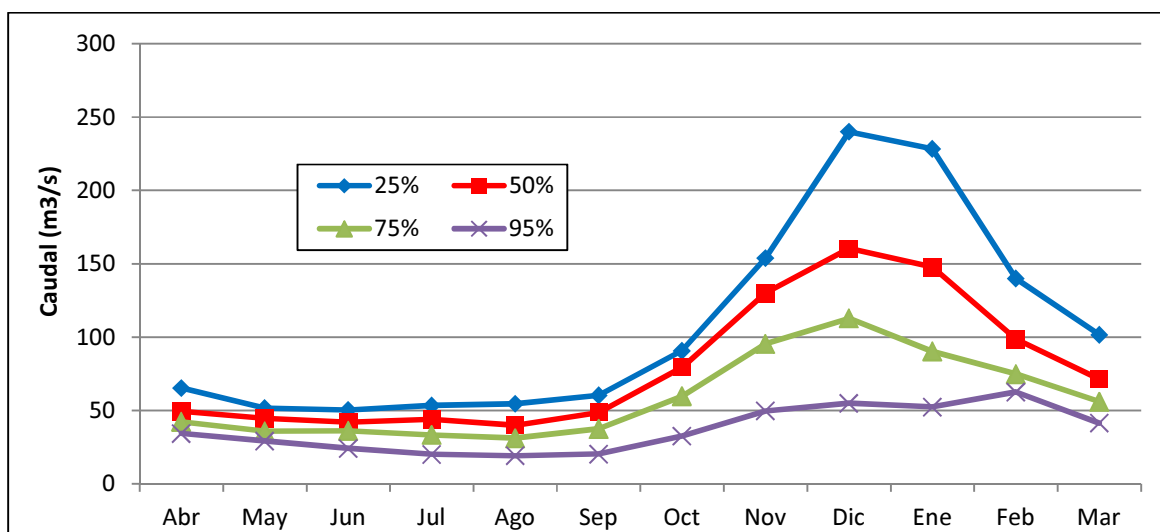


Figura 4-7. Curva de Variación Estacional Río Maipo en San Alfonso

#### 4.2 Descripción Comuna de Isla de Maipo

La comuna de Isla de Maipo pertenece administrativamente a la provincia de Talagante, al sur poniente de la Región Metropolitana a unos 40 Km, y a 12 Km, del sudeste de la ciudad de Talagante situada entre los 33°44' Latitud Sur y los 70°58' Longitud Oeste. Abarca una superficie aproximada de 189.1 Km<sup>2</sup> (Figura 4-8).

La población total del área, según el Censo realizado en 2002, es de 25.798 habitantes de la cual el 73.12% es urbana y el 26.88% es rural. En general la comuna se caracteriza por ser eminentemente rural, y tiene gran productividad agrícola.

El río Maipo cruza la comuna de oeste a sur, por toda su extensión. La comuna de Isla de Maipo limita al norte con las comunas de Talagante y El Monte, al Oeste con la comuna de Melipilla, al este con San Bernardo y Buin, y al sur con la comuna de Paine. En la Figura 4-8 se aprecia la ubicación de la comuna.

Específicamente el área donde se realizarán los mapas posteriormente corresponde al Río Maipo que cruza la comuna de sur a norte.

Esta comuna se encuentra en una zona intermedia, con un clima templado, en la los valores en la Tabla 4.3 se puede apreciar los valores de los distritos agroclimáticos y en la Figura 4-9 se puede apreciar el área que abarcan en la comuna.

Tabla 4.3. Distritos Agroclimáticos Comuna Isla de Maipo

Distrito Agroclimático	Temperatura máxima media [°C]	Temperatura mínima media anual [°C]	Temperatura media anual [°C]	Radiación Solar Directa media anual [W/m2]	Evapotranspiración media anual [mm]	Precipitación Total anual [mm]
1	20.6	7.6	13.4	569	1230.6	495.0
2	21.9	8.6	14.5	532	1296.0	497.1

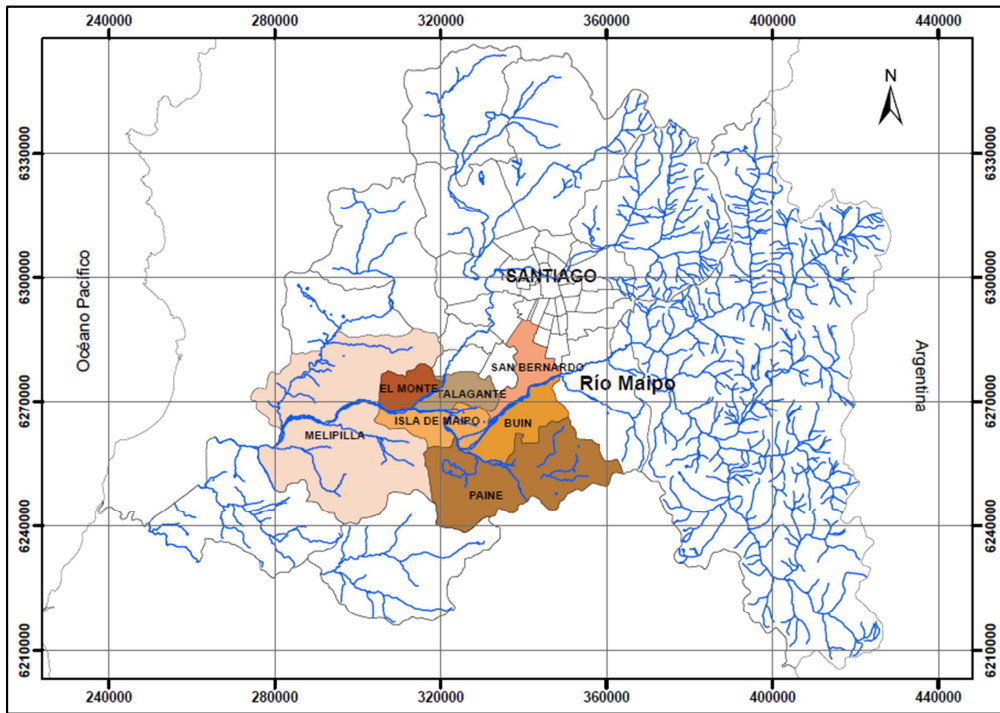


Figura 4-8. Ubicación Comuna de Isla de Maipo

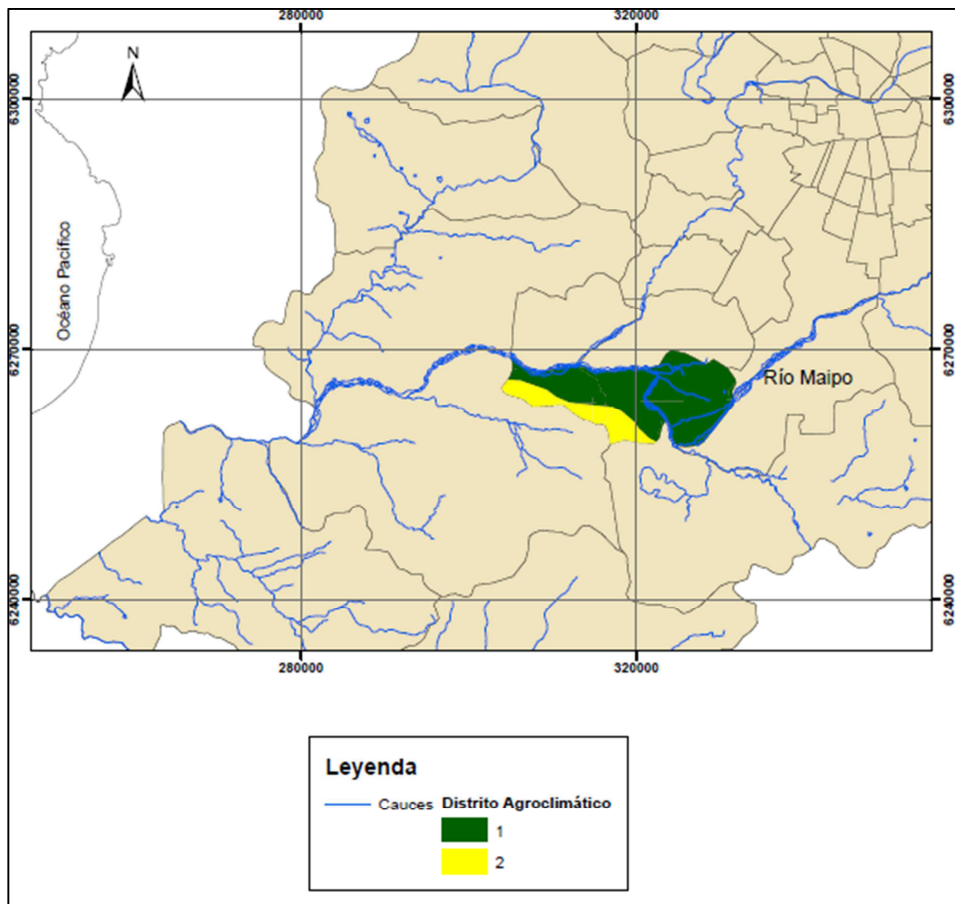


Figura 4-9. Distritos Agroclimáticos Comuna de Isla de Maipo



Esta comuna es principalmente agrícola, y posee poca industrialización, además de ser un sector casi netamente rural. Predominan los matorrales y existe presencia de bosques nativos. En la Figura 4-10 se presenta el uso de suelo de esta comuna.

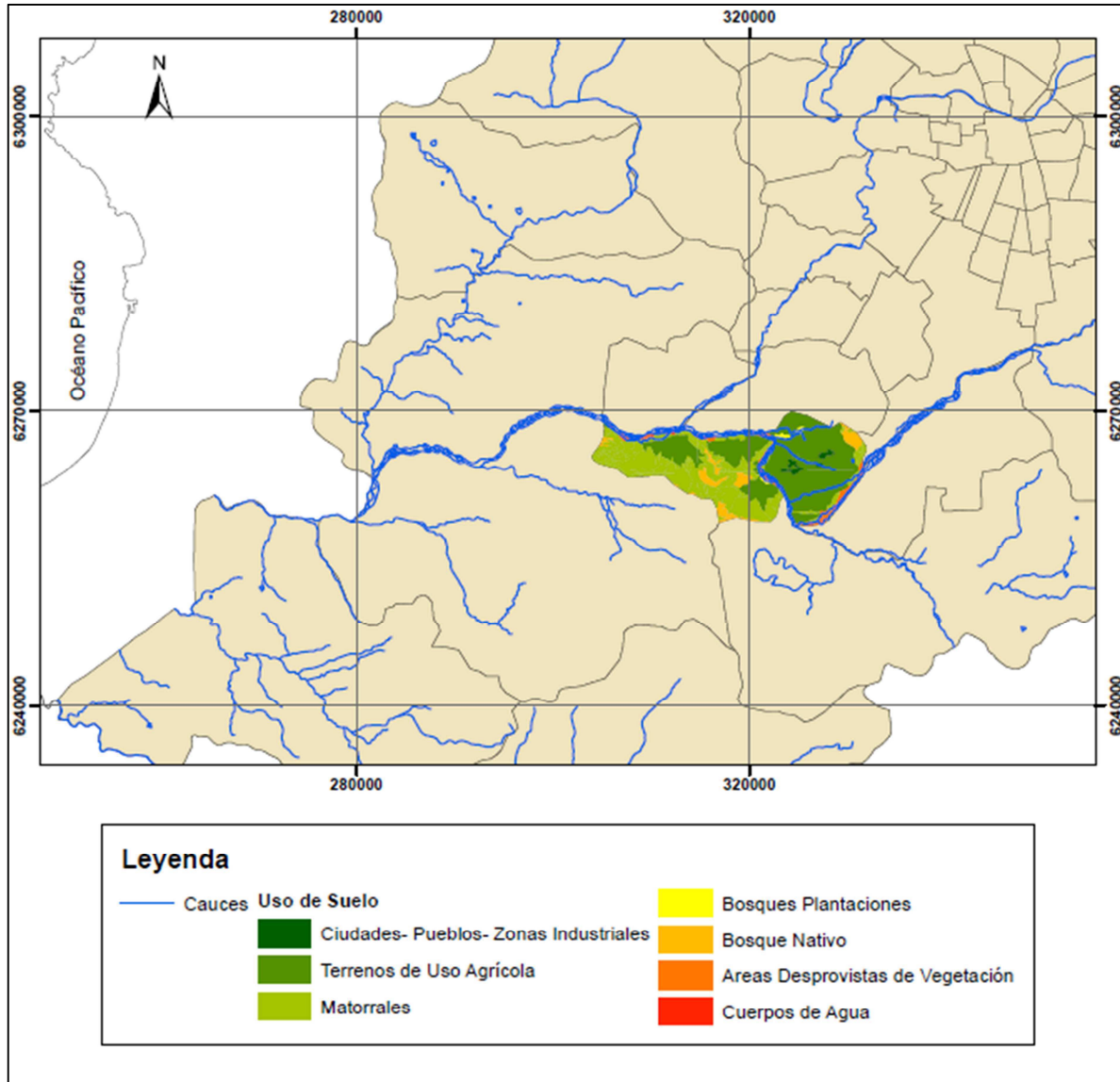


Figura 4-10. Uso de Suelo Comuna Isla de Maipo

La caracterización de la zona de estudio cumple un rol muy importante, primero porque da a conocer las características generales de dónde se está realizando el estudio. Por otra parte, se tiene un mejor conocimiento de cuáles pueden ser los parámetros de entrada, asociados al uso de suelo, del modelo hidrológico.

## CAPÍTULO 5. RECOPIACIÓN Y PREPARACIÓN DE DATOS

Para realizar la modelación hidrológica, se necesitan como datos de entrada información relativa a las precipitaciones y temperaturas registradas en la cuenca, así como también datos de caudal en algunos puntos de control para poder realizar la comparación de caudales modelados con caudales observados. Dado que la cuenca Maipo en San Alfonso cuenta con el Embalse el Yeso, se necesita también la evaporación y la curva de almacenamiento. A continuación se detalla las estaciones utilizadas tanto para la información meteorológica como fluviométrica.

### 5.1 Fluviometría

Se tomó como punto de control fluviométrico las estaciones Río Maipo en San Alfonso, que corresponde al punto de salida de la misma cuenca, y la estación Río Maipo en el Manzano, que está aguas abajo de la confluencia entre los ríos Maipo y Colorado. El período estudiado va desde 1982 hasta 2010. Las características de ambas estaciones se presentan en la Tabla 5.1.

En general ambas estaciones poseen muy poco vacíos, por lo que su relleno se efectuó mediante correlaciones lineales a nivel diario. En la Figura 5-2 se presenta el hidrograma en la estación Maipo en San Alfonso y en la Figura 5.2 se puede apreciar la ubicación de las estaciones fluviométricas.

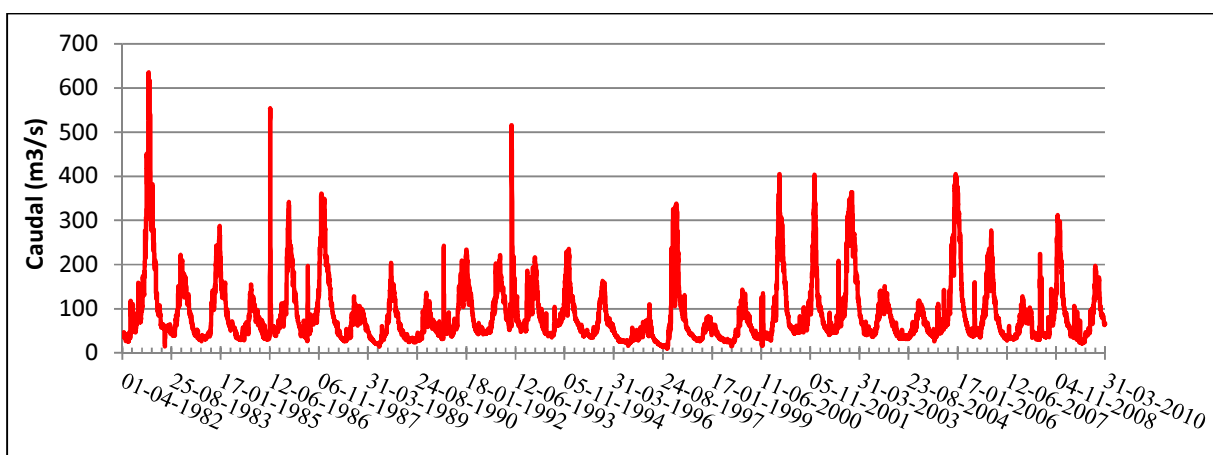


Figura 5-1. Caudal medio diario en Maipo en San Alfonso

Tabla 5.1. Estaciones Fluviométricas.

Estación	Código BNA	Área (Km <sup>2</sup> )	Elevación (m.s.n.m)	Coordenadas		Registro	
				Este	Norte	Inicio	Fin
Río Maipo en San Alfonso	05704002-5	2850	1092	379489	6266439	ago-1940	-
Río Maipo en el Manzano	05710001-K	4968	850	372031	6281956	nov-1946	-

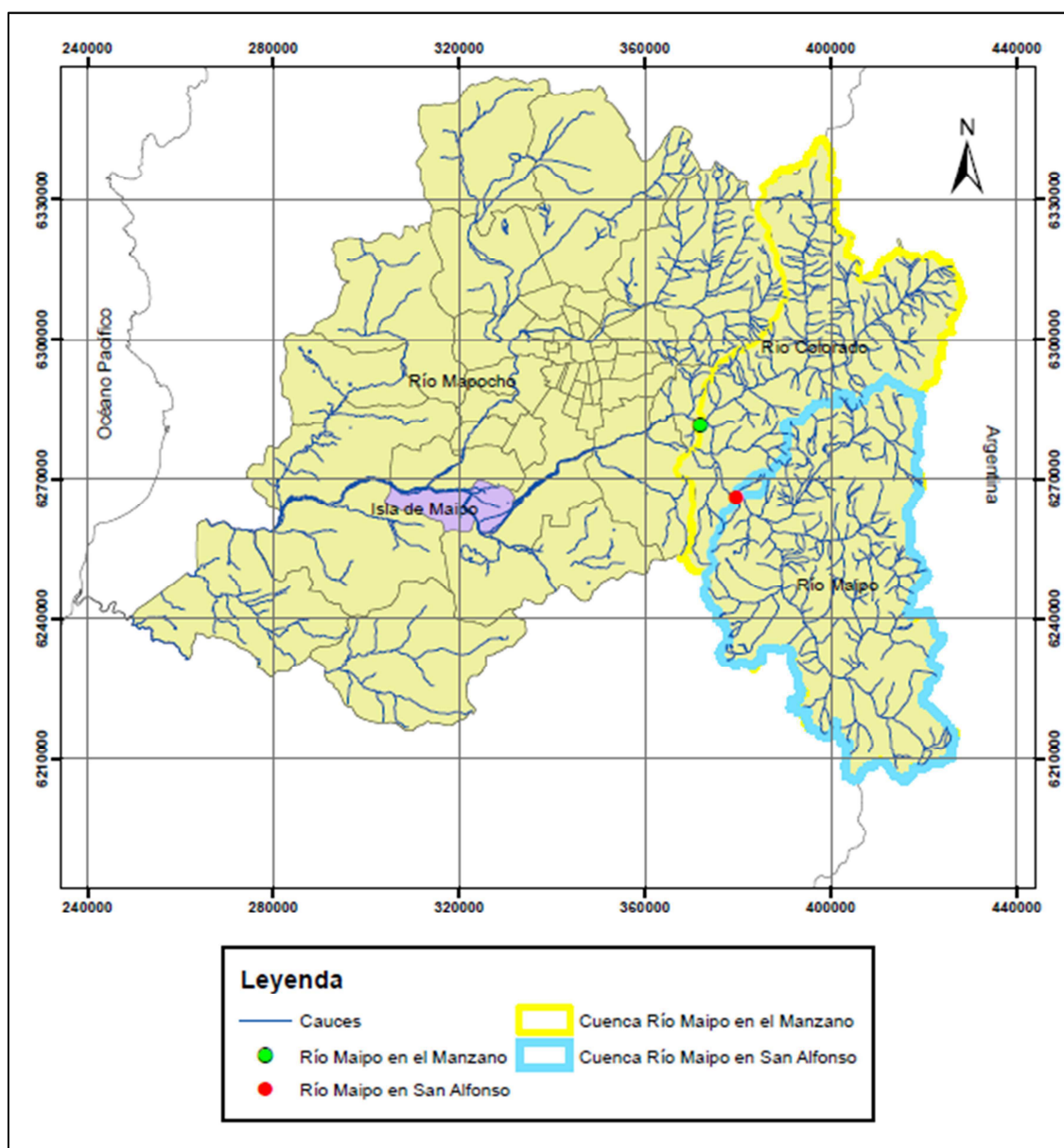


Figura 5-2. Estaciones Fluviométricas

## 5.2 Precipitación

Dentro del área de estudio existe una gran cantidad de estaciones con información pluviométrica. El objetivo principal es obtener la precipitación representativa para toda la cuenca en estudio, por lo que se escogen estaciones dispersas en la zona. Otro de los criterios de selección es buscar estaciones con un período de registro adecuado. Se tomó mayor consideración en la parte baja de la Región Metropolitana, ya que representa en mejor manera el área de estudio. En la Figura 5-3 se puede apreciar las estaciones seleccionadas para la recopilación de información pluviométrica.

El período del estudio va desde abril de 1982 hasta marzo de 2010. En el Anexo digital de este informe, se puede revisar el registro de cada estación.



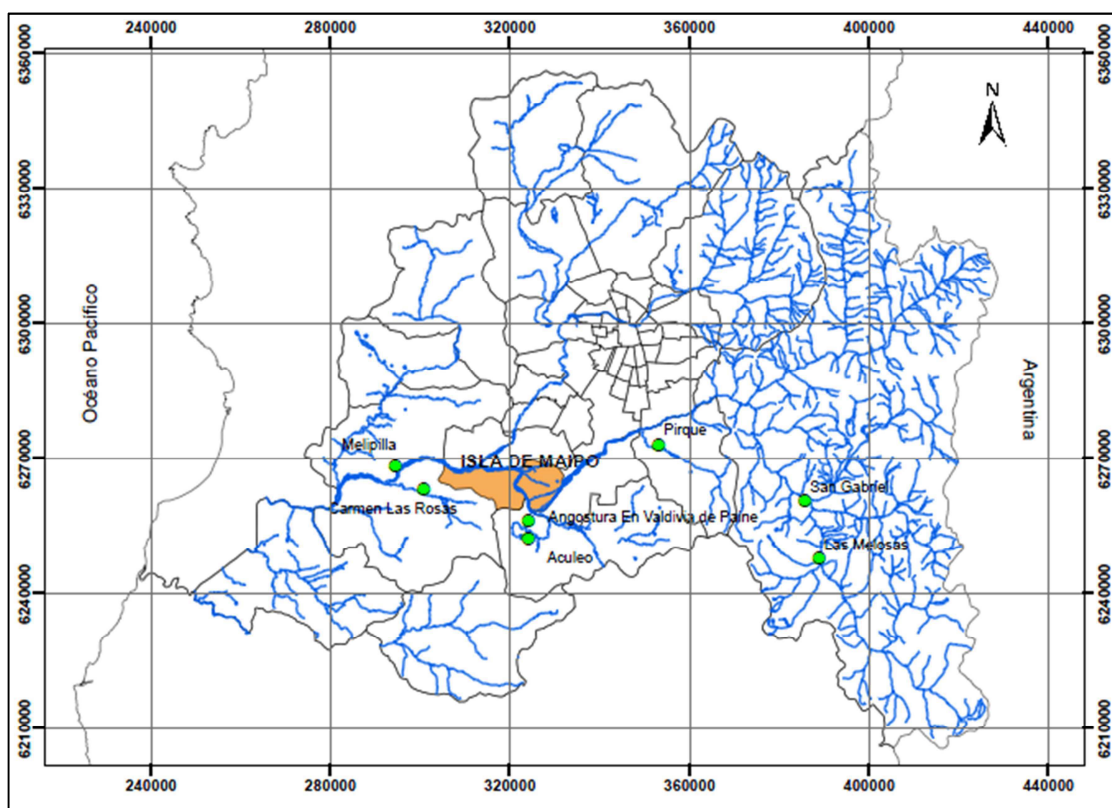


Figura 5-3. Estaciones con información de precipitaciones escogidas.

Ya que las estaciones entregan información discreta acerca de la precipitación en la cuenca, se hace necesaria la confección de un gradiente de precipitación para poder obtener la precipitación en cualquier punto de la zona de estudio. Se seleccionaron sólo 5 estaciones de las escogidas mostradas en la Figura 5-3 para la realización de dicho gradiente, ya que a que presentaban una mejor tendencia. Debido a la variabilidad que presentan los datos a nivel diario, se optó por la realización de gradientes mensuales. En la

Tabla 5.2 se detalla las estaciones pluviométricas seleccionadas para la confección del gradiente de precipitaciones.

Tabla 5.2. Estaciones Pluviométricas Seleccionadas

Nombre Estación	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altura [m.s.n.m]	Registro	
					Inicio	Fin
Carmen De Las Rosas	05740004-8	300845	6263428	165	nov-1930	-
Angostura En Valdivia de Paine	05716004-7	324143	6256490	350	jun-1988	-
<b>Pirque</b>	<b>05711003-1</b>	<b>353200</b>	<b>6273620</b>	<b>659</b>	<b>oct-1967</b>	<b>-</b>
San Gabriel	05704004-1	385807	6261125	1266	dic-1977	-
Las Melosas	05701005-3	389044	6248225	1527	jul-1962	-

En la Figura 5-4 se presentan las precipitaciones medias diarias en la estación Pirque para el período seleccionado, 01 de abril de 1982 hasta 31 de marzo de 2010. Las precipitaciones observadas son moderadas, con máximos de 120 mm por día y con muchos días sin lluvias.

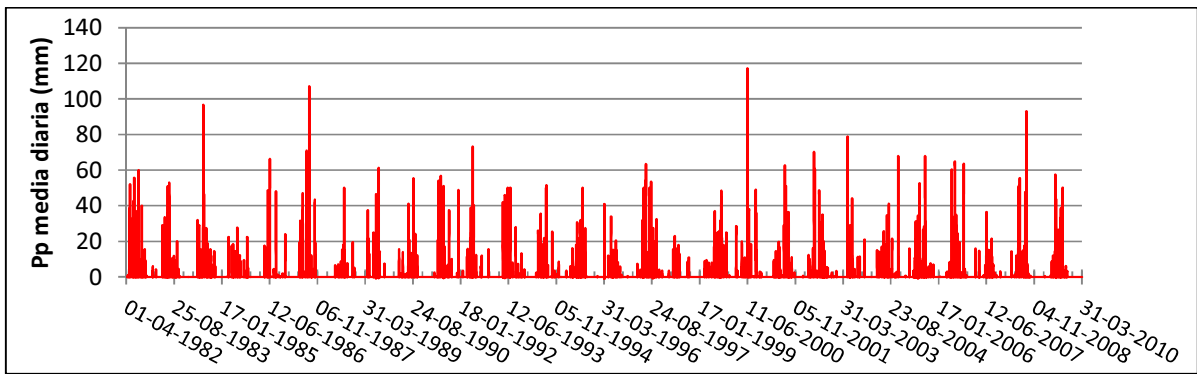


Figura 5-4. Precipitaciones diarias observadas estación base Pirque

Por otra parte, en la Figura 5-5 se presenta el gradiente de precipitaciones para cada mes con el fin de determinar la precipitación en las bandas de elevación.

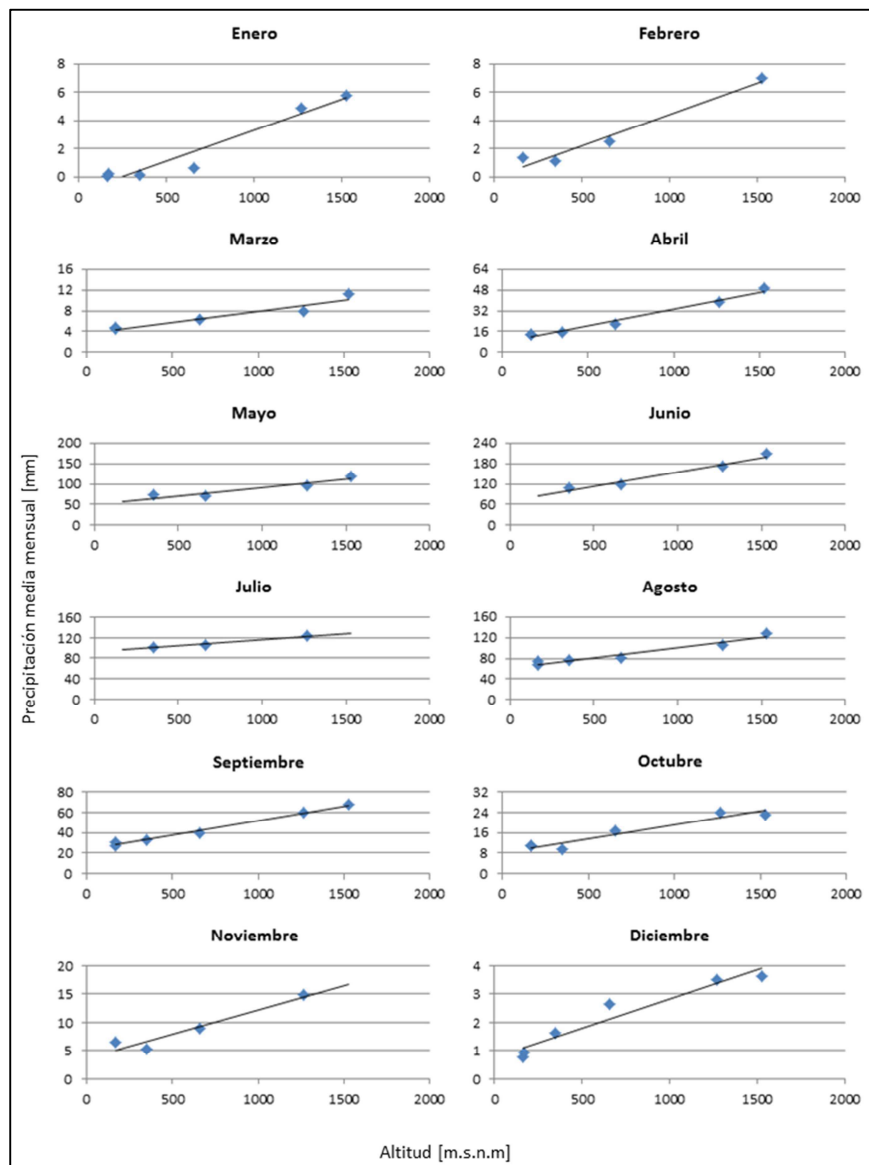


Figura 5-5. Gradiente de Precipitación

En la Tabla 5.3 se puede apreciar los valores de las correlaciones lineales mensuales  $y=ax+b$ , y el coeficiente de determinación.

**Tabla 5.3. Valores Regresión Lineal**

MES	a [mm/m]	b [mm]	r <sup>2</sup>
ENERO	0.004	-1.06	0.94
FEBRERO	0.004	0.01	0.96
MARZO	0.004	3.71	0.90
ABRIL	0.026	7.86	0.98
MAYO	0.039	51.63	0.88
JUNIO	0.085	71.62	0.96
JULIO	0.025	91.67	0.95
AGOSTO	0.038	62.41	0.95
SEPTIEMBRE	0.029	23.15	0.99
OCTUBRE	0.011	8.41	0.92
NOVIEMBRE	0.009	3.63	0.93
DICIEMBRE	0.002	0.74	0.93

Para la confección de las series de precipitaciones en cada banda se seleccionó como estación base, la estación Pirque, ya que cuenta con la mayor cantidad de información disponible, a pesar de que se encuentra a una altura bastante menor que la cuenca.

De esta manera, para determinar la precipitación observada en cualquier día del mes  $i$ , se procede como sigue:

$$PP_{j,d} = \frac{(a_i * H_j + b_i)}{Prom_i} * PP_d$$

*Ecuación 5-1*

Donde

$H_j$  = Altura media en banda  $j$

$PP_j$  = Precipitación en altura  $j$

$Prom_i$  = Precipitación media mes  $i$  en Estación Base, en mm

$a_i$  = coeficiente "a" de la correlación para el mes  $i$

$b_i$  = coeficiente "b" de la correlación para el mes  $i$

$PP_d$  = Precipitación en día  $d$ , Estación Base, en mm

Esta metodología no considera variaciones entre años, ya que se considera que los gradientes mensuales son iguales para todos los años futuros. Esto podría inducir a errores por la posibilidad de que los gradientes no se mantengan de la misma manera para años futuros, debido a que los gradientes en general dependen del tipo de año, (húmedo o seco) y también se ven afectados por el cambio climático.

### 5.3 Temperatura

Para determinar la temperatura en función de la altura se debe contar con la mayor cantidad de estaciones meteorológicas posibles. En la Figura 5-6 se presentan las estaciones seleccionadas que presentan la mayor cantidad de información.

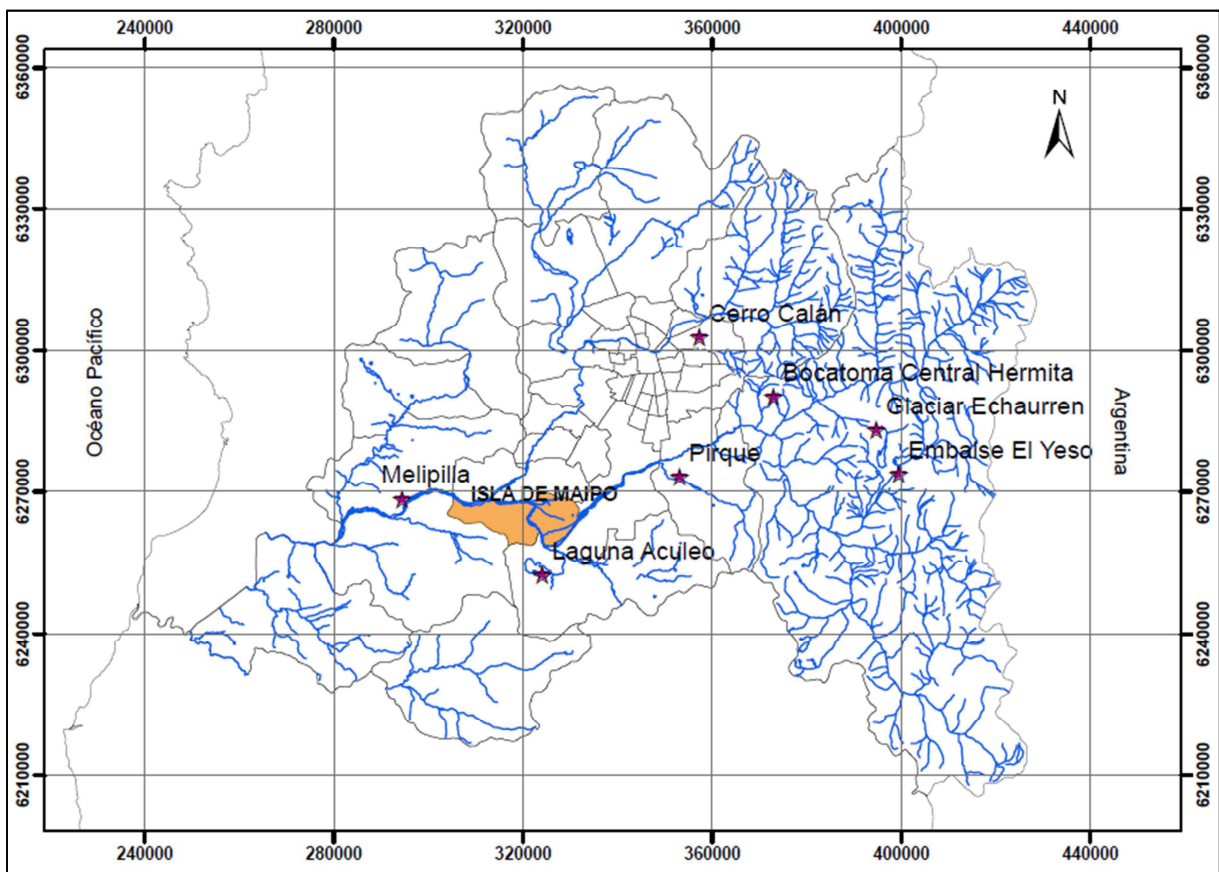


Figura 5-6. Estaciones con datos de temperatura escogidas.

Como se dijo anteriormente, el período de estudio se consideró desde abril de 1982 hasta marzo de 2010. En el Anexo digital de este informe, se puede revisar los datos con las temperaturas registradas en las estaciones.

De las estaciones escogidas mostradas en la Figura 5-3, sólo se seleccionaron 6, las cuales se presentan en la Tabla 5.4. Al igual que con la precipitación, se debe generar un gradiente de temperatura para determinar la temperatura en cualquier elevación de la cuenca.

Tabla 5.4. Estaciones de temperatura Seleccionadas

Nombre Estación	Código BNA	UTM Este	UTM Norte	Altura [m.s.n.m]	Registro	
					Inicio	Fin
Melipilla	05740005-6	296074	6271064	168	ago-1971	-
Laguna Aculeo	05716005-5	326365	6248857	360	nov-1988	-
<b>Pirque</b>	<b>05711003-1</b>	<b>352877</b>	<b>6272845</b>	<b>659</b>	<b>oct-1967</b>	<b>-</b>
Bocatoma la Ermita	05720003-0	373099	6309978	1350	abr-1987	-
Embalse El Yeso	05703008-9	399083	6273104	2475	abr-1962	-
Glaciar Echaurren	05703011-9	295274	6284645	3850	feb-1971	mar-2003

En la Figura 5-7 se presenta la temperatura media diaria observada en la estación base Pirque. Se observan temperaturas medias que van desde los 0 grados hasta los 25 grados Celsius. La temperatura media diaria se calculó como el promedio entre la temperatura máxima y la temperatura mínima de cada día.

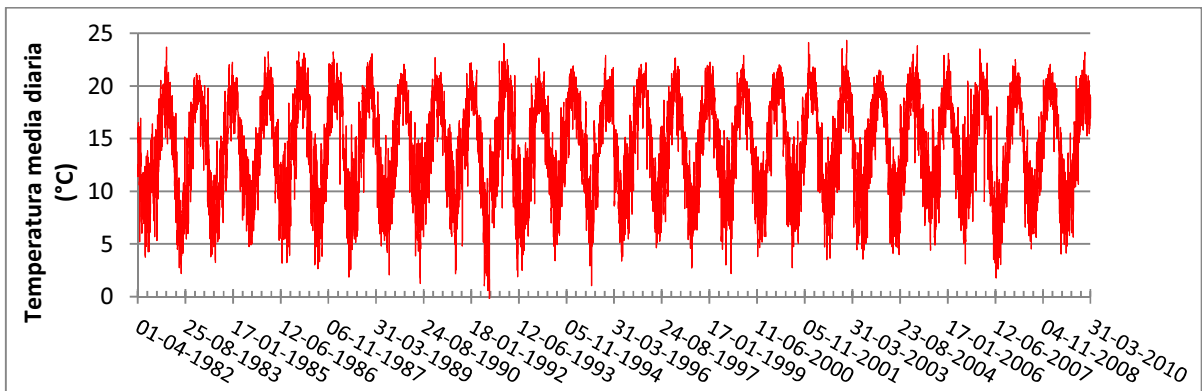


Figura 5-7. Temperaturas medias diarias observadas estación base Pirque

En la Figura 5-8 se presentan los gradientes de temperaturas mensuales utilizados para determinar la temperatura en cada banda de elevación.

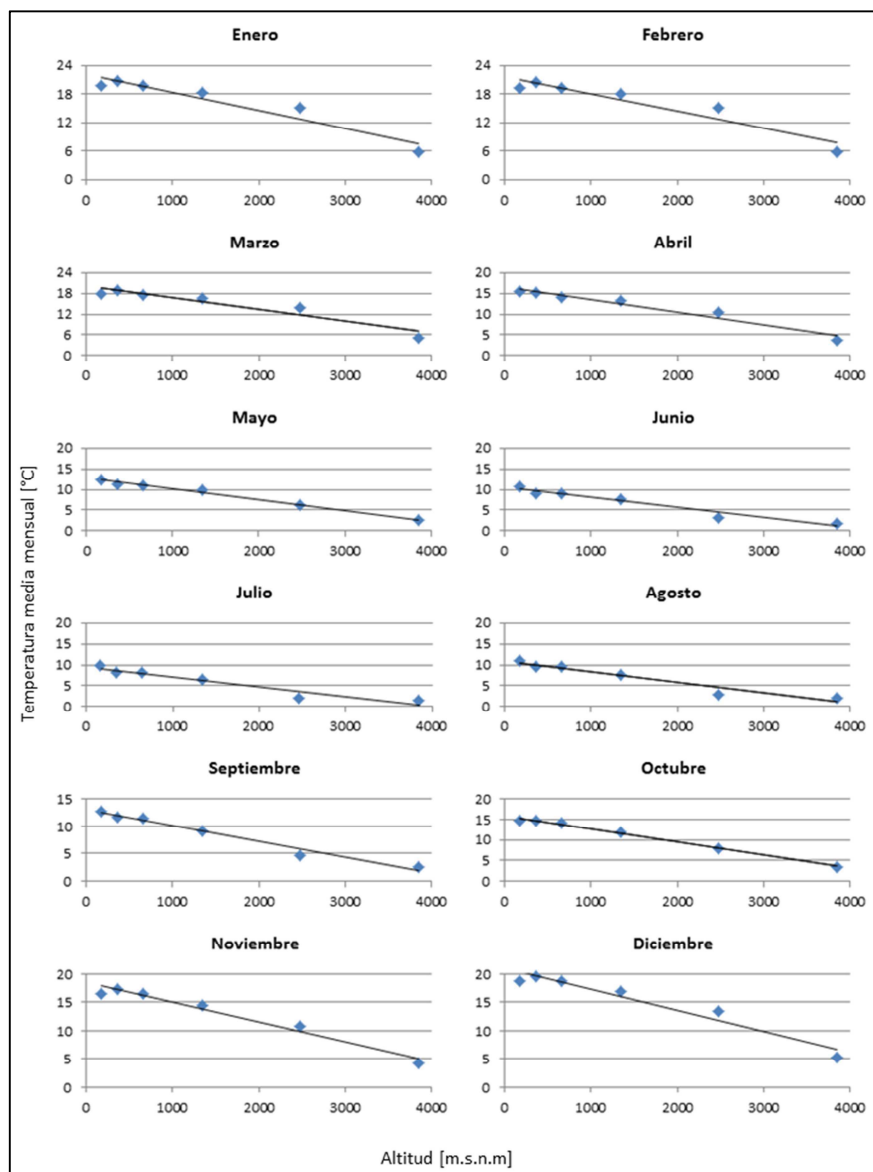


Figura 5-8. Gradientes de Temperatura

En la Tabla 5.5 se puede apreciar los valores de las correlaciones lineales mensuales  $y=ax+b$ , y el valor del coeficiente de determinación.

**Tabla 5.5. Valores correlación lineal**

MES	a [°C/m]	b [°C]	r <sup>2</sup>
ENERO	-0.004	22.23	0.92
FEBRERO	-0.004	21.72	0.90
MARZO	-0.003	20.03	0.91
ABRIL	-0.003	16.45	0.96
MAYO	-0.003	12.74	0.99
JUNIO	-0.002	10.52	0.96
JULIO	-0.002	9.53	0.92
AGOSTO	-0.003	10.91	0.94
SEPTIEMBRE	-0.003	12.85	0.98
OCTUBRE	-0.003	15.82	0.99
NOVIEMBRE	-0.004	18.46	0.97
DICIEMBRE	-0.004	20.92	0.95

Para determinar la temperatura en cada banda de elevación también se utilizó la estación Pirque como base, a pesar de estar fuera de la cuenca, a una altura más baja.

De esta manera, para determinar la temperatura observada en cualquier día del mes  $i$ , se procede como sigue:

$$T_{j,d} = \frac{(a_i * H_j + b_i)}{Prom_i} * T_d$$

*Ecuación 5-2*

Donde

$H_j$  = Altura media en banda  $j$

$T_{j,d}$  = Temperatura en altura  $j$ , en el día  $d$

$Prom_i$  = Temperatura media mes  $i$  en Estación Base, en °C

$a_i$  = coeficiente "a" de la correlación para el mes  $i$

$b_i$  = coeficiente "b" de la correlación para el mes  $i$

$T_d$  = Temperatura en día  $d$ , Estación Base, en °C

Cabe notar que este gradiente no es modificado para la obtención de las proyecciones futuras, por lo que se asume que el clima tiene el mismo comportamiento en cuanto a cómo varía la temperatura con la altura. Este supuesto podría no ser del todo válido debido a que precisamente al introducir al análisis los efectos del cambio climático puede generarse alguna modificación en la distribución del gradiente térmico de la cuenca.

#### 5.4 Fracción de Nubosidad

Como el modelo requiere de la fracción de horas sin nubes durante el día, se utilizó el Anuario Meteorológico de la década de 1980 para obtener los datos promedios de nubosidad para cada mes. Si bien es cierto, la modelación hidrológica en este trabajo es a nivel diario, se optó por generar una nubosidad constante en todas las bandas y en todos los días del mismo mes. Con la consideración de que si existía precipitación durante dicho día, entonces se consideraba un día

completamente nublado. En la Tabla 5.6 se puede ver la fracción de nubosidad utilizada para los días sin lluvia, correspondiente a la estación Quinta Normal ubicada en el centro de Santiago a unos 520 m.s.n.m.

**Tabla 5.6. Fracción de Nubosidad Estación Quinta Normal**

Mes	8 Horas	14 Horas	22 Horas	Promedio
ENERO	0.11	0.06	0.19	0.12
FEBRERO	0.29	0.39	0.3	0.33
MARZO	0.28	0.26	0.28	0.27
ABRIL	0.7	0.66	0.58	0.65
MAYO	0.8	0.74	0.66	0.73
JUNIO	0.73	0.71	0.46	0.63
JULIO	0.64	0.59	0.51	0.58
AGOSTO	0.48	0.38	0.3	0.39
SEPTIEMBRE	0.46	0.49	0.43	0.46
OCTUBRE	0.44	0.4	0.33	0.39
NOVIEMBRE	0.43	0.44	0.41	0.43
DICIEMBRE	0.25	0.19	0.15	0.20

## 5.5 Embalse el Yeso

Para incluir el embalse en la modelación hidrológica se necesitan algunos datos técnicos, los cuales se muestran en la Tabla 5.7.

**Tabla 5.7. Características Embalse el Yeso**

Nivel	Elevación (m.s.n.m)	Volumen (m3)	Área (m2)
Máximo	2.556,0	260.108.113,0	8.993.051,0
Mínimo	2.515,0	10.000.000,0	2.853.824,0
Volumen Muerto	2.511,5	7.000.000,0	1.677.546,0
Vertedero Auxiliar	255.178,0	223.034.081,0	8.561.276,0

Además se necesita la curva de almacenamiento, la cual es obtenida a través de la siguiente fórmula:

$$V_{\text{útil}} = 0.473759 * (Z_i - 2507)^{1.6272773} - 5.47 [HM^3] \quad \text{Ecuación 5-3}$$

Altura Inicial: 2511.5 m.s.n.m

Volumen Muerto: 7 HM<sup>3</sup>

En la Figura 5-9 se presenta la curva de almacenamiento del embalse.

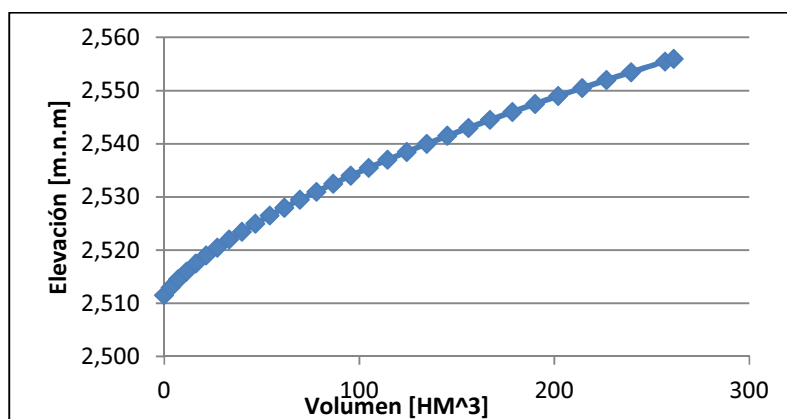


Figura 5-9. Curva de Almacenamiento del Embalse el Yeso

Por último, se necesitan los datos de evaporación en el embalse. Estos datos fueron obtenidos desde planillas con indicadores observados. En la Tabla 5.8 se muestra la disponibilidad de los datos.

Tabla 5.8. Disponibilidad de Datos Evaporación Embalse el Yeso

1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
							X	X	X	X	X	X	X
1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Para obtener la evaporación faltante, se realizaron correlaciones Caudal vs. Evaporación entre años con volumen anual de agua semejantes. En el Anexo digital de este informe se presenta el detalle de éstos cálculos. En la Figura 5-10 se presenta la evaporación observada en el embalse.

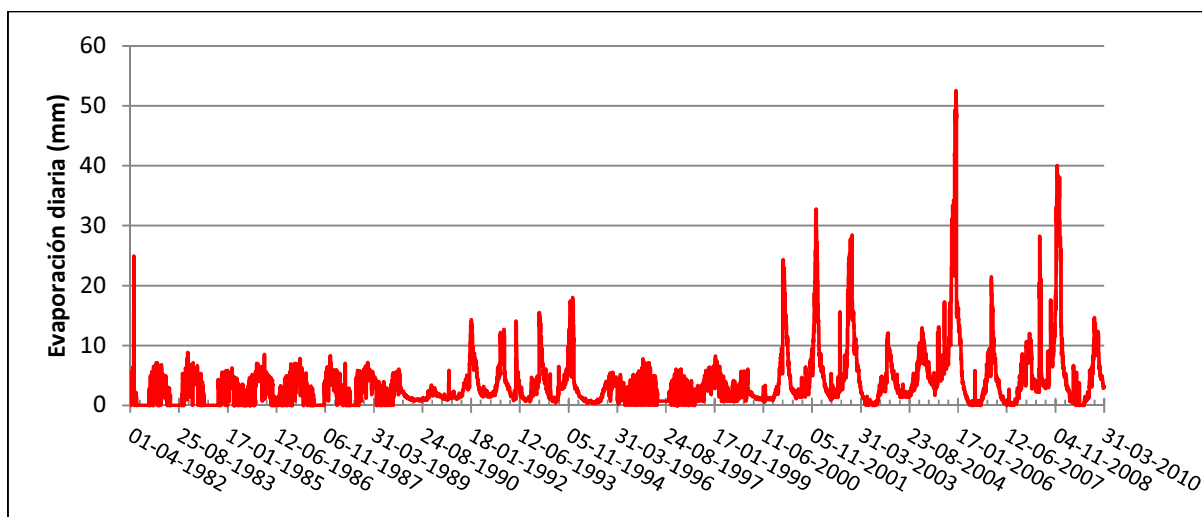


Figura 5-10. Evaporación Observada Embalse el Yeso



## CAPÍTULO 6. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

---

La calibración del modelo hidrológico se realizó entre el 01 de abril de 1982 y 31 de marzo de 1990, dejando el período comprendido entre el 01 de abril de 1990 al 31 de marzo de 2010 para la validación del modelo. Estos períodos son lo suficientemente extensos como para contemplar los años húmedos y secos. El proceso de calibración cuenta básicamente de los siguientes pasos:

- I. Introducir datos de entrada y los parámetros en el modelo. Los datos observados corresponden al área, precipitación, temperatura, caudales y la fracción de nubosidad, mientras que los parámetros a calibrar están mostrados en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.
- II. Posteriormente se ejecutó el modelo analizando principalmente los siguientes aspectos:
  - i. Inspección visual: Se compararon los hidrogramas observado y simulado de manera que tuviesen una semejanza suficientemente buena como para *confiar* en el modelo.
  - ii. Volumen anual (en cada año de la calibración): La diferencia entre los volúmenes de los caudales observados y simulados debe ser la menor posible. Esto, con el fin de que el modelo simule la misma cantidad de agua que la observada.
  - iii. Curva de Duración: Los gráficos con la Probabilidad de Excedencia de ambos caudales (observado y simulados) deben ser lo más parecidas posibles, esto con el fin de no sobreestimar o subestimar el caudal para una probabilidad dada.
  - iv. Cobertura nival, Evapotranspiración Real y Potencial: Estos parámetros calibrados deben compararse con la información del balance hídrico nacional elaborado por la DGA. Estos parámetros deben estar acorde con la información existente para la zona para que el modelo sea *confiable*.
  - v. La curva de operación del Embalse el Yeso debe representar, la operación real del embalse durante los años de la calibración.
- III. El proceso de calibración es iterativo y hay que ir modificando los parámetros hasta que los requerimientos anteriores se cumplan. Como los criterios anteriores son más bien subjetivos y se basan en la experiencia del usuario, se utiliza el coeficiente de Nash Sutcliffe para determinar si un modelo es bueno o no. Este coeficiente se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Qsim_i - Qobs_i)^2}{\sum_i (Qobs_i - \bar{Qobs})^2} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Donde

$Qsim_i$  = Caudal Simulado día  $i$

$Qobs_i$  = Caudal Observado día  $i$

$\bar{Qobs}$  = Promedio Caudales Observados

Existen ciertos parámetros que pueden cambiar dependiendo de la altura de la cuenca, o bien, de otros parámetros. Existen otras variables, en cambio, que son constantes para todo el período y para toda la cuenca. Si se desea, se puede tener un parámetro para cada banda de elevación y en función de otros parámetros. Sin embargo, esta opción es mucho más lenta para realizar el proceso de calibración. Además la ventaja en la modelación no es significativamente mejor que utilizando ciertas variables constantes. A continuación se presentan los resultados obtenidos a nivel diario para la calibración de la cuenca definida por la estación Maipo en San Alfonso.

## 6.1 Calibración Maipo en San Alfonso

Los parámetros mostrados en la Tabla 6.1 fueron utilizados para obtener el ajuste de la calibración.

**Tabla 6.1. Parámetros de Ajuste Calibración**

Nombre Parámetro	Valor	Observación
Kc	1	Este parámetro se calibró con el fin de obtener una Evapotranspiración consecuente con el Manual de ET de Chile.
Soil Water Capacity (SWC)	550 mm	-
Deep Water Capacity (DWC)	300 mm	-
Runoff Resistance Factor (RORF)	5-2	Se separó la banda 1 del resto de las bandas, ya que presentaba mejor comportamiento
Root Zone Conductivity (RZC)	10-60 mm/día	Se separó la banda 1 del resto de las bandas, ya que presentaba mejor comportamiento
Deep Conductivity (Dwcon)	7mm/día	-
Preferred flow direction	0.5-0.6%	Se separó la banda 1 del resto de las bandas, ya que presentaba mejor comportamiento
Initial Z1	10%	-
Initial Z2	25%	-
Factor Precipitación (Ppfactor)	0.81	Factor que multiplica a la precipitación
Humidity	80%	Humedad Relativa en días de lluvia
Wind	4 m/s	-
Albedo Lower Bound (AlbedoLow)	0.64	-
Albedo Upper Bound (AlbedoHigh)	0.7	-
Rnet Other	3	-
Melting Point (MeltP)	10°C	-
Freezing Point (FreezP)	4°C	-

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan los hidrogramas observados y simulados, el caudal anual y los caudales medios mensuales obtenidos en la calibración. Además en la Tabla 6.2 se presentan los valores estadísticos para la calibración.

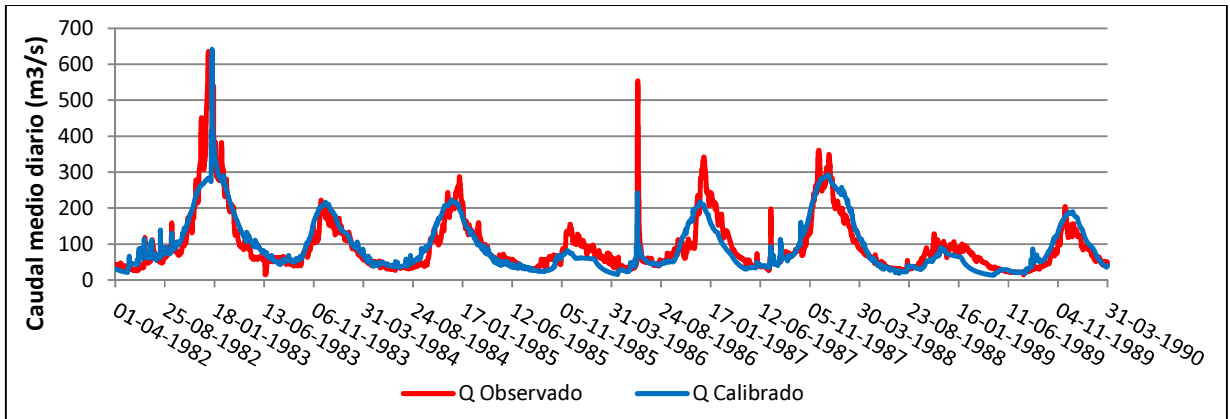


Figura 6-1. Resultados Calibración. Hidrograma

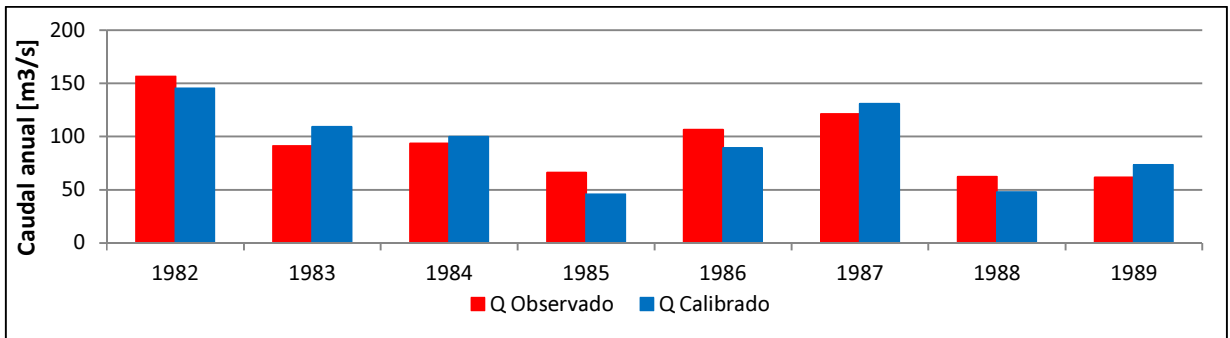


Figura 6-2. Resultados Calibración. Caudal Anual

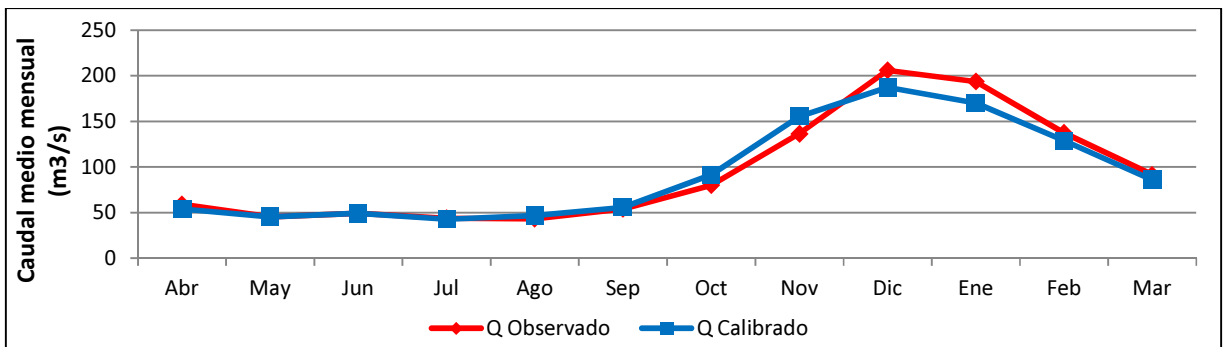


Figura 6-3. Resultados Calibración. Caudales medios mensuales

Tabla 6.2. Resultado Calibración

	Calibración
NS	0.76
NS-Log	0.70
R <sup>2</sup>	0.76
WR <sup>2</sup>	0.84
Δ Volumen	-2%

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, el modelo calibrado en WEAP representa de manera bastante acertada el régimen de la cuenca, sobretodo el régimen pluvial. Sin embargo, como se muestra en la Figura 6-1 los peaks son subestimados, lo que produce algunos problemas debido a que para este trabajo los caudales altos son de mayor interés. En la Figura 6-4 se muestra la curva de duración de caudales observados y generados. Como se aprecia en esta figura, existe un mayor error en los caudales sobre los 100 m<sup>3</sup>/s, que corresponden a los caudales con probabilidad de excedencia bajo al 30%.

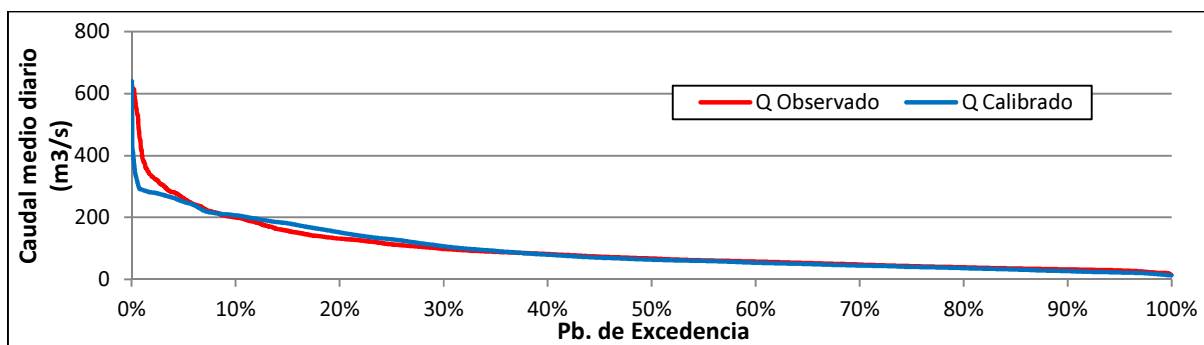


Figura 6-4. Resultados Calibración. Curva de Duración

## 6.2 Validación Maipo en San Alfonso

La validación del modelo se realizó entre el 1 de abril de 1990 y el 31 de marzo de 2010. Como en este proceso se verifica la veracidad del modelo utilizando los mismos parámetros obtenidos en la calibración, es de esperar que el coeficiente NS disminuya. Sin embargo se espera que la inspección visual y los criterios de la calibración mencionados anteriormente se sigan cumpliendo. En las figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se presentan los hidrogramas observados y simulados, el caudal anual y los caudales medios mensuales. Además en la Tabla 6.3 se presentan los valores estadísticos para la validación.

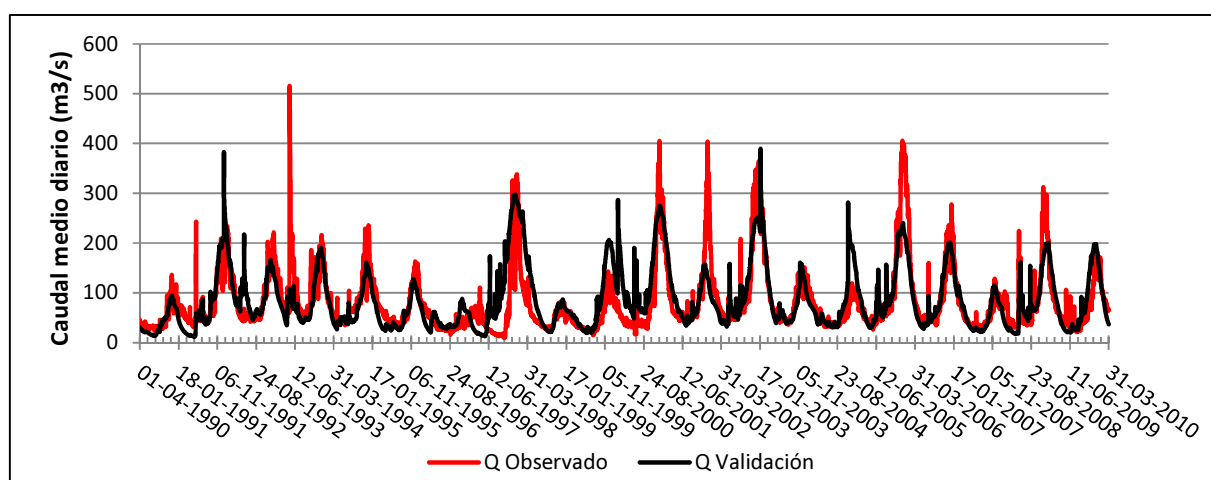


Figura 6-5. Resultado Validación. Hidrograma

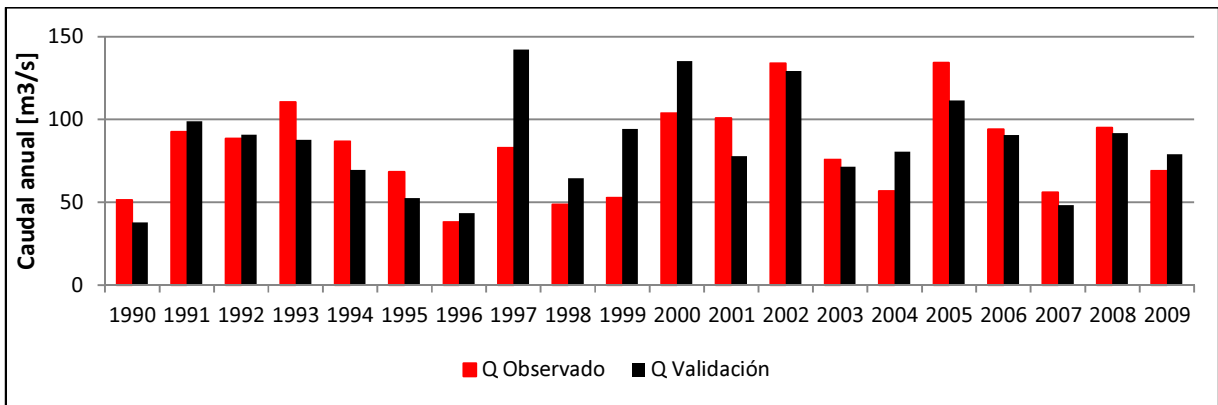


Figura 6-6. Resultados Validación. Caudal Anual

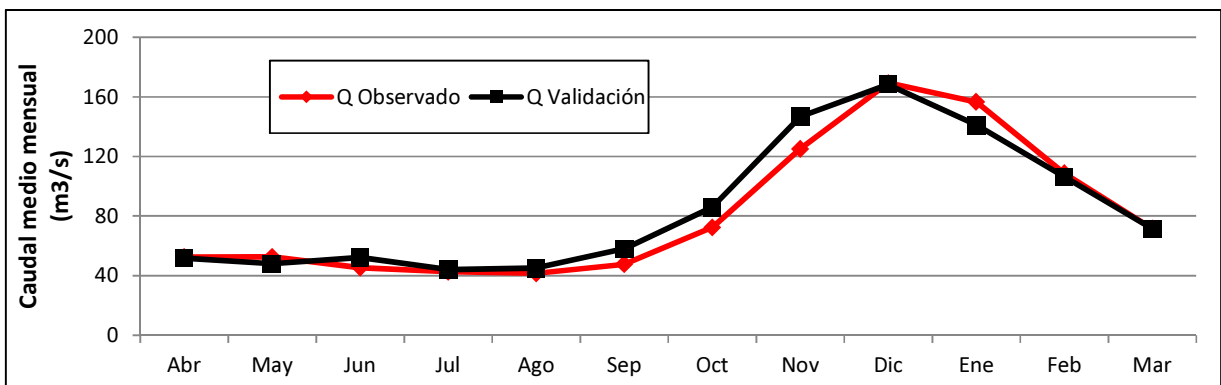


Figura 6-7. Resultados Validación. Caudales medios mensuales

Tabla 6.3. Resultados Validación

	Validación
NS	0.56
NS-Log	0.44
R <sup>2</sup>	0.59
WR <sup>2</sup>	0.54
Δ Volumen	4%

Se puede apreciar en las figuras anteriores, y al igual que en la calibración, se obtiene una buena representación del régimen pluvial de la cuenca, pero existe una subestimación de los caudales peak. También se observa mayor diferencia en los caudales anuales de algunos años específicos, como los años 1997 y 1999, que presenta una diferencia de un 40%.

En la Figura 6-8 se muestra el hidrograma para todo el período (calibración + validación).

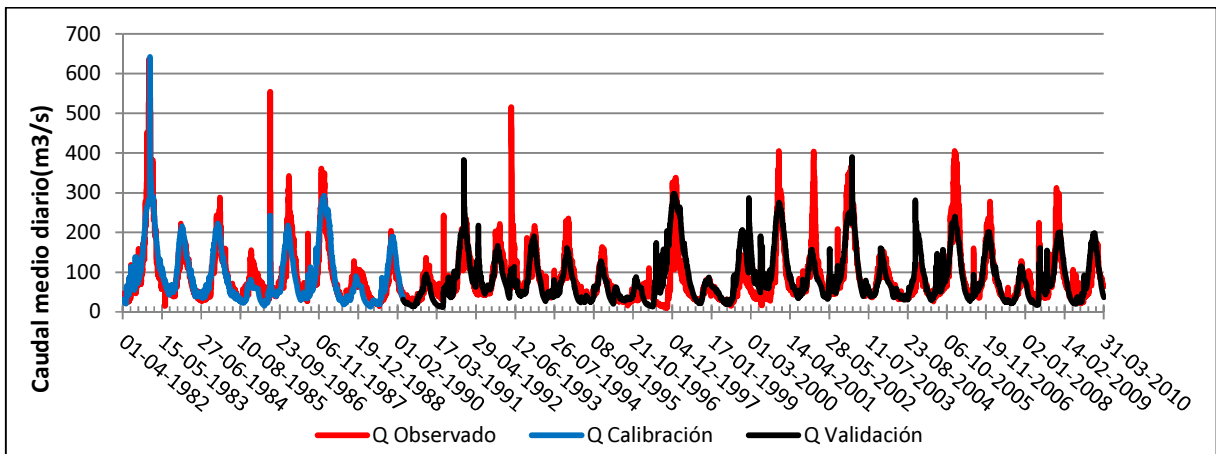


Figura 6-8. Hidrograma Período Completo.

En la Figura 6-9 se presenta la curva de duración para el período completo, en la cual se conserva lo observado anteriormente. Existe una muy buena modelación para caudales con probabilidad de excedencia mayor al 25%, es decir, menor a los 100 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 6-10 se muestra la relación entre los caudales medios mensuales simulados con respecto a lo que sería una simulación perfecta (línea roja). Se vuelve a apreciar la variabilidad en caudales mayores a 100 m<sup>3</sup>/s. El coeficiente  $WR^2$  es de 0.64.

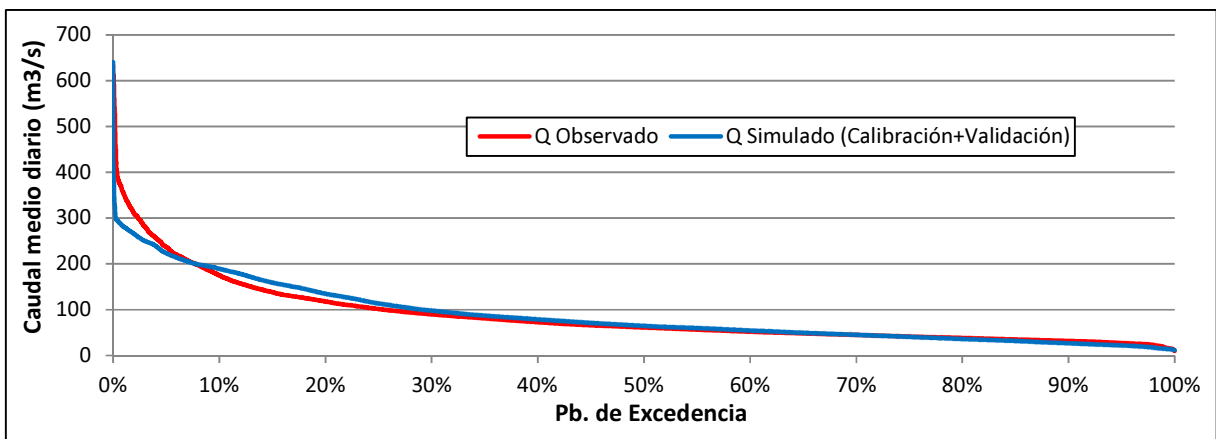


Figura 6-9. Curva Duración Período de estudio 1982-2010

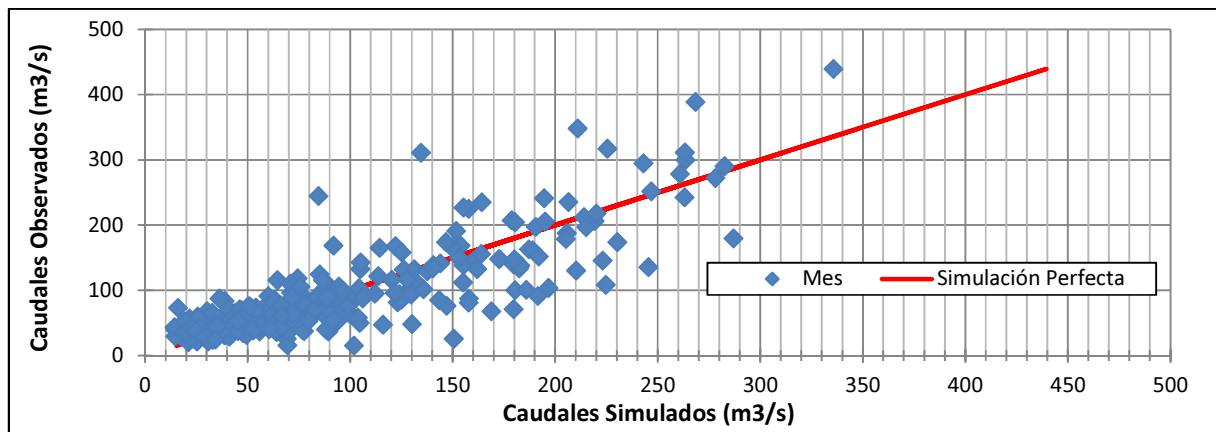


Figura 6-10. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados, período de estudio 1982-2010

Ya que el interés en este trabajo es la estimación de caudales altos en los períodos nival y pluvial se corrigieron los caudales simulados a través de la correlación entre los caudales simulados y los caudales observados máximos anuales en ambos períodos, teniendo como base la simulación perfecta. De esta manera, en la Figura 6-11 se presenta dicha correlación para el período nival y en la Figura 6-12 para el período pluvial, donde la figura a la izquierda representa la correlación entre caudales simulados obtenidos del modelo versus los caudales observados, y en la figura derecha se tienen los caudales simulados corregidos versus los caudales observados.

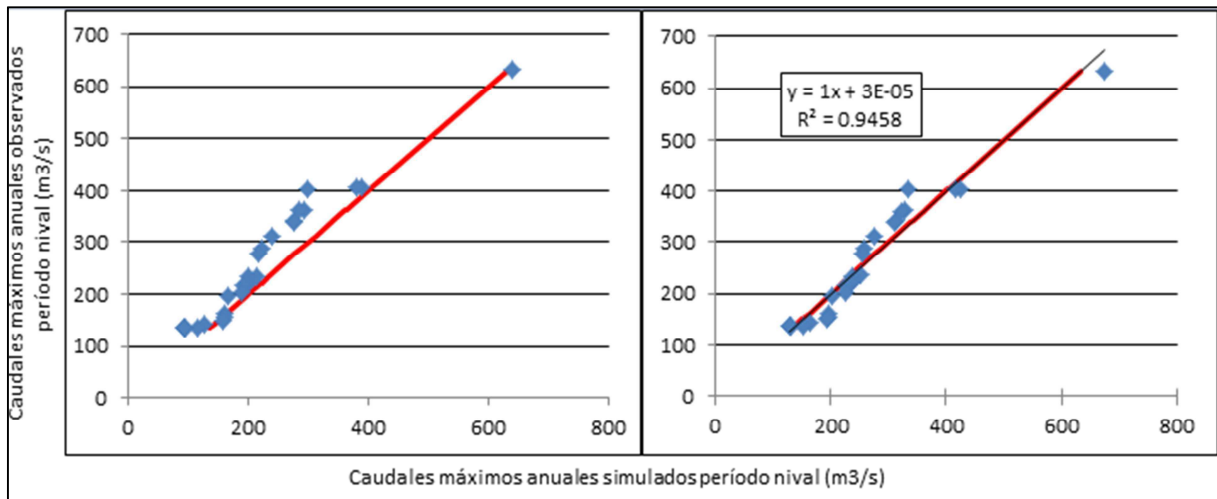


Figura 6-11. Ajuste Caudales máximos anuales nivales. Período 1982-2010

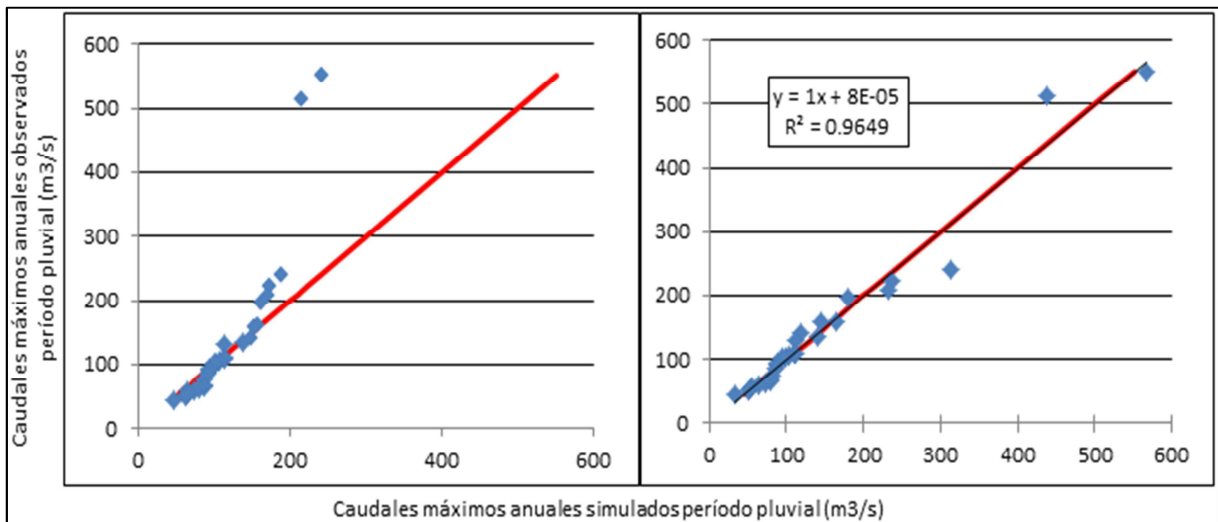


Figura 6-12. Ajuste Caudales máximos anuales pluviales. Período 1982-2010

Las fórmulas para corregir los caudales en cada período son las siguientes:

**Período Nival:**  $Q_{SimuladoCorregido} = Q_{Simulado} * 0.9956 + 37.4839$  Ecuación 6-2

**Período Pluvial:**  $Q_{SimuladoCorregido} = Q_{Simulado} * 4.8093 - 596.58 \left( Q > \frac{130m^3}{s} \right)$  Ecuación 6-3

**Período Pluvial:**  $Q_{\text{SimuladoCorregido}} = Q_{\text{Simulado}} * 1.1674 - 20.602 \left( Q \leq \frac{130m^3}{s} \right)$  Ecuación 6-4

La ecuación 6.3 es la que presenta la mayor pendiente y término libre, esto quiere decir que los caudales simulados son muy distintos a los observados, para caudales mayores a 130 m<sup>3</sup>/s. Esto es consecuente con los resultados del modelo, el cual no pudo estimar de mejor manera los caudales en ese rango.

En la Tabla 6.4 se presentan los caudales medios diarios máximos anuales observados, simulados (Línea base) y corregidos para el período completo de estudio (1982-2010).

**Tabla 6.4. Caudales medios diarios máximos anuales (m<sup>3</sup>/s) Maipo en San Alfonso Ordenados, Línea Base.**

Año	Período NIVAL			Período PLUVIAL		
	Caudal Observado	Caudal Simulado	Caudal Simulado Corregido	Caudal Observado	Caudal Simulado	Caudal Simulado Corregido
1982	633	641	675	158	139	141
1983	222	216	252	108	149	119
1984	287	223	259	58	86	80
1985	155	92	129	92	86	80
1986	342	217	254	552	242	567
1987	361	292	328	196	113	111
1988	136	92	129	86	114	112
1989	204	190	226	60	86	79
1990	136	95	132	46	47	34
1991	234	381	417	241	102	98
1992	221	166	203	75	215	438
1993	216	190	227	513	114	112
1994	235	161	197	104	80	73
1995	163	128	165	65	64	54
1996	136	92	129	51	62	52
1997	338	298	334	110	173	236
1998	136	92	129	131	172	231
1999	143	285	322	53	92	87
2000	405	275	311	135	189	314
2001	403	157	193	102	99	96
2002	364	390	425	208	158	165
2003	151	160	197	94	106	103
2004	136	277	313	69	64	54
2005	405	240	277	142	154	144
2006	277	201	237	160	92	87
2007	136	115	152	61	73	65
2008	312	201	237	223	161	179
2009	197	198	235	106	91	86



Cabe mencionar que lo que se corrigió fue la proporcionalidad que presentaban los caudales simulados contra los caudales observados, para que existiera una mejor correlación entre estos caudales.

Para obtener los caudales asociados a distintas probabilidades de excedencia en ambos períodos se realizó un análisis de frecuencia con estos caudales. Utilizando el test del chi cuadrado y la inspección visual, la mejor distribución para estos caudales fue la distribución Log-Pearson, presentada en la Figura 6-13 y Figura 6-14.

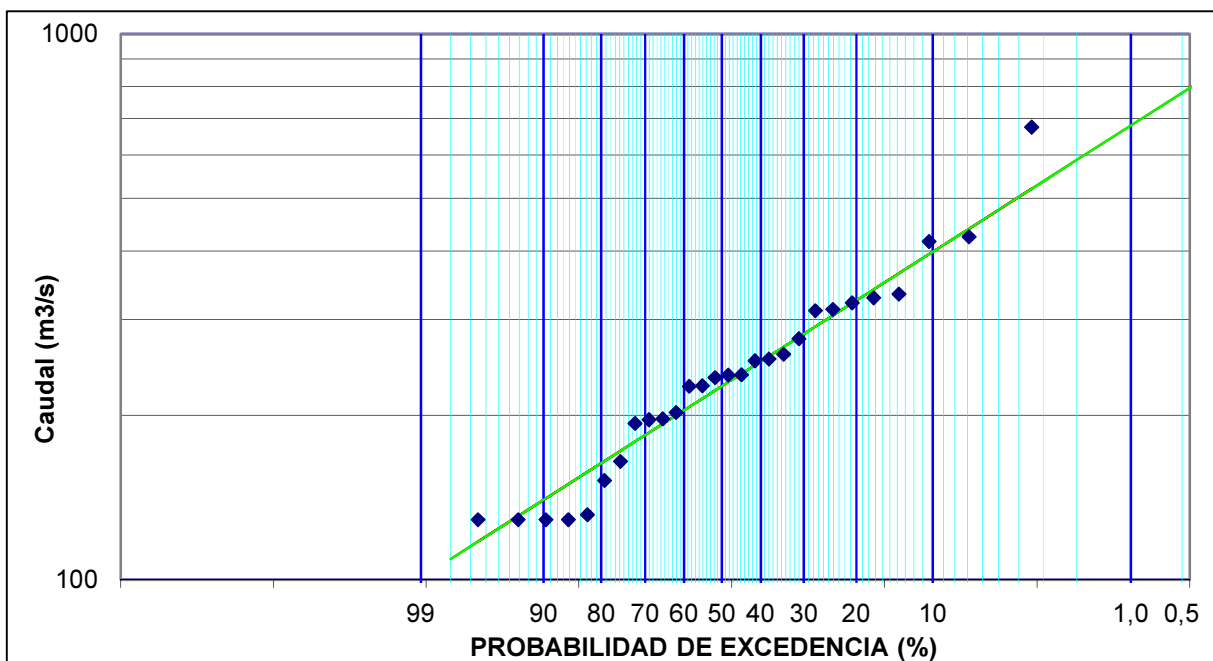


Figura 6-13. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período nival, Línea Base.

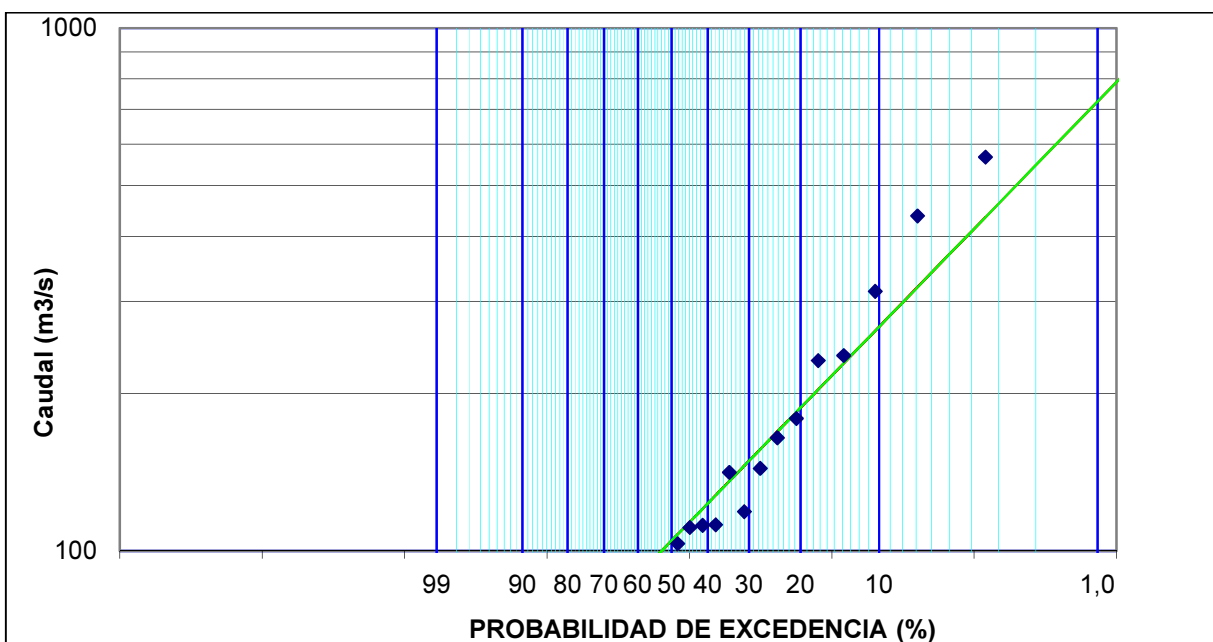


Figura 6-14. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período pluvial, Línea Base.

## CAPÍTULO 7. APLICACIÓN DEL MODELO WEAP A ESCENARIO FUTURO

---

### 7.1 Análisis de Información del modelo meteorológico PRECIS.

Para la evaluación de los impactos del cambio climático en el mediano plazo (2040-2070), se decidió utilizar los resultados obtenidos por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile en el “Proyecto Anillos SOC-28: Impactos Sociales y Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bio-Bio”. En este proyecto se empleó el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), desarrollado por el Hadley Center del Reino Unido, integrándolo en una grilla con espaciamiento horizontal de 25 km, la cual cubre a Chile. El modelo fue forzado en sus bordes laterales por el modelo global ECHAM5.

Las variables de interés para la realización de este trabajo son las precipitaciones y las temperaturas a nivel diario para la línea base (1982-2010) y las series futuras de precipitación y temperatura generadas para el escenario A1B, en el cual se centra este estudio debido a que representa a un escenario donde el desarrollo socio-económico global llega a un equilibrio.

Para generar la serie de precipitaciones y temperaturas diarias en el punto de interés, el cual corresponde a la estación base Pirque, se debe realizar primero los siguientes pasos:

- I. Se ubica la grilla donde se sitúa la estación base, y se extrae la información de la variable simulada (precipitación y temperatura) con el modelo PRECIS en el período concurrente con el estudio. Para este caso se obtuvo información desde 1920 hasta 2070. Recordar que se extrae la información para las cuatro esquinas de la grilla por lo que se tienen 4 series de datos para cada variable. Ver Figura 7-1.
- II. Luego, se realiza una curva de duración para cada mes de los datos en el período base y se escoge cuál de estos 4 puntos representa mejor los datos observados de la estación base según el valor del coeficiente de correlación entre ambos datos. En la Figura 7-2 a) se presenta la curva de duración del mes de enero para la temperatura. Las series representan cada esquina de la grilla. La que presenta mejor correlación corresponde a la esquina 4.
- III. Posteriormente se relacionan los datos meteorológicos simulados versus los datos meteorológicos observados y se genera una correlación en puntos con el mismo comportamiento.
- IV. Finalmente, se considera esta correlación válida para el resto del período y de esta manera se obtienen la información de precipitación y temperatura para la estación base en el futuro. En las Figura 7-2 b) y c) se presentan las curvas de duración para la precipitación y temperatura respectivamente correspondiente a la línea base. Se aprecia que las curvas son prácticamente iguales, debido a que las probabilidades de excedencia entre los datos observados y escalados deben ser muy parecidas.

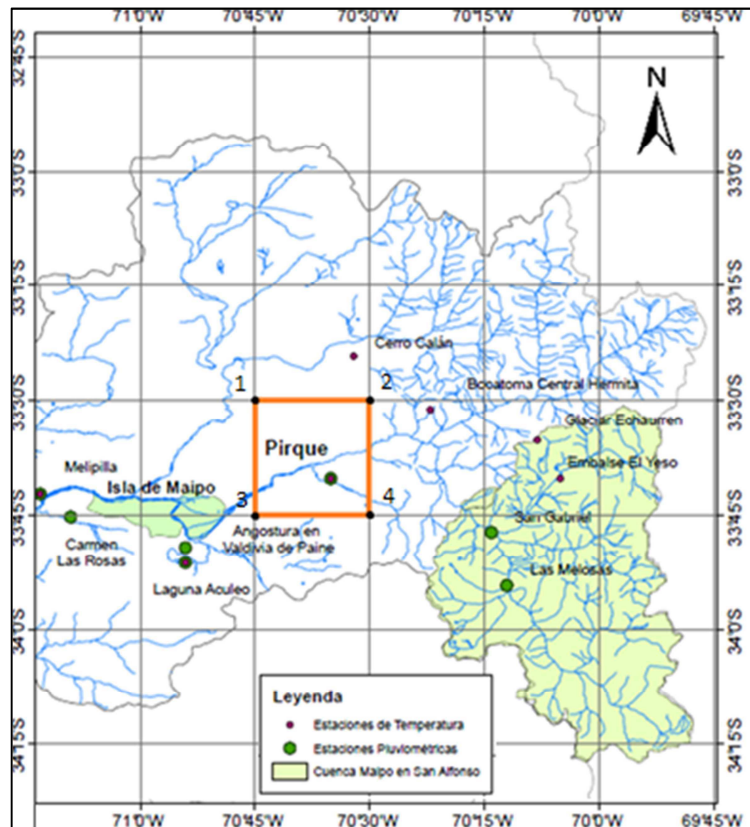


Figura 7-1. Extracción Variables modelo PRECIS

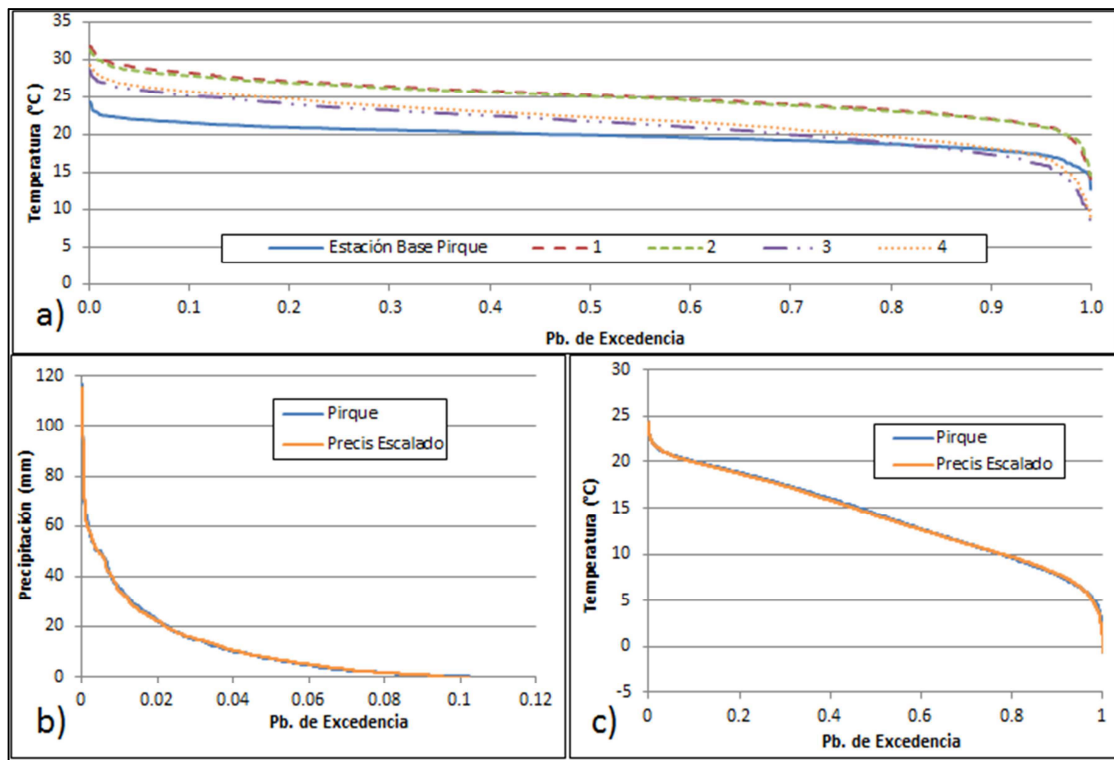


Figura 7-2. Resultado Escalamiento de datos meteorológicos. Período 1982-2010.

## 7.2 Resultados Futuros

Los datos de precipitación y temperatura futuros generados anteriormente para la estación base, fueron introducidos en el modelo hidrológico WEAP ya calibrado, para el período 2040-2070, con el fin de obtener la serie de caudales futuros simulados, los que se utilizarán para la generación de los mapas de riesgo de inundación. En la Figura 7-3 a) se observan las precipitaciones medias mensuales observadas, escaladas para la línea base y futuras (2040-2070) para la estación base Pirque. Como se puede apreciar, existe una disminución en esta variable hacia futuro, exceptuando un aumento en el promedio del mes de diciembre. En la Figura 7-3 b) se presentan las temperaturas medias mensuales observadas, escaladas para la línea base y futuras (2040-2070) para la estación base Pirque. Para esta variable existe un aumento de hasta 2 grados, lo que se deduce del cambio climático. Finalmente, en la Figura 7-3 c) están los caudales medios mensuales observados, los caudales generados a partir de la temperatura y precipitación escalada para la línea base y caudales futuros (2040-2070) para la estación Maipo en San Alfonso. Consecuentemente con el análisis anterior, existe una disminución en los caudales medios mensuales, sobre todo en el período de deshielo, el que presenta una disminución de 40 m<sup>3</sup>/s.

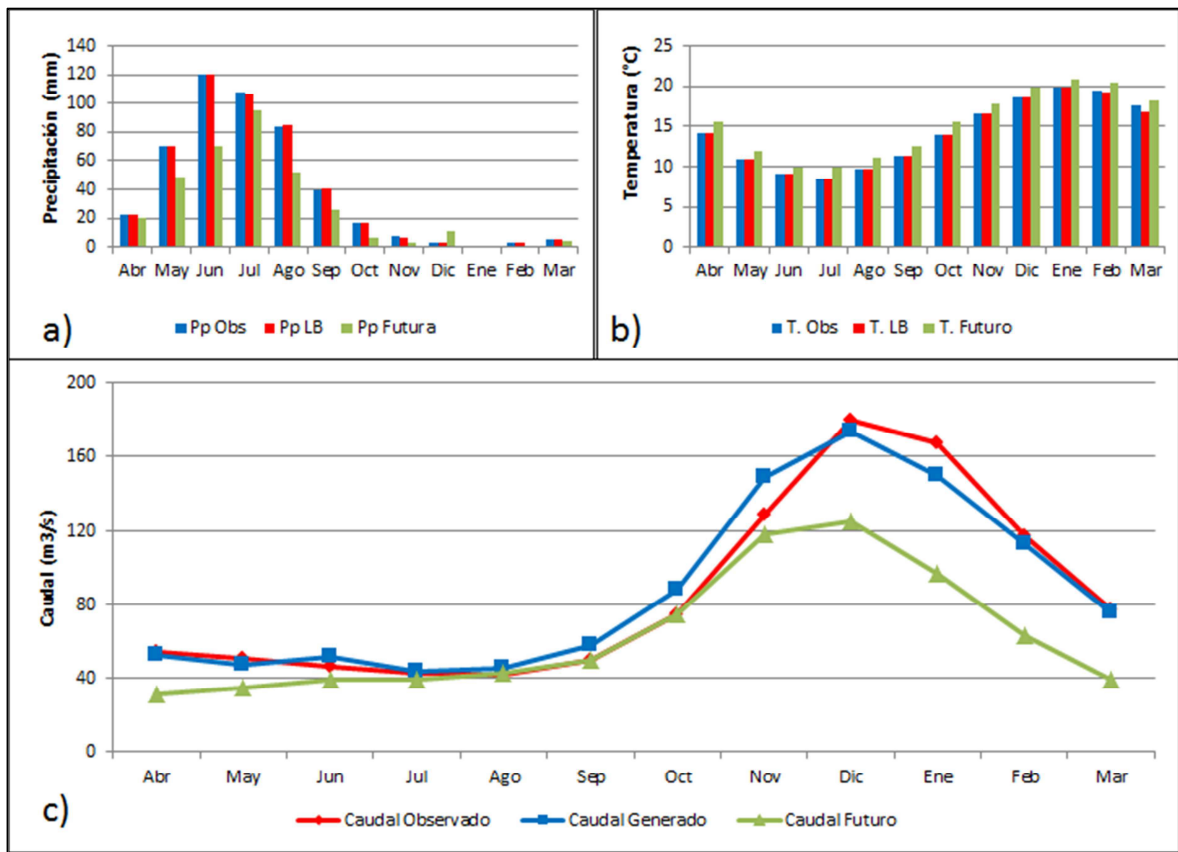


Figura 7-3. Resultados Futuros.

En la Figura 7-4 se presenta la curva de duración de caudales medios diarios observados, línea base y futuros para la estación Maipo en San Alfonso. Igualmente, se aprecia la disminución de los caudales medios diarios con respecto a los caudales de la línea base.

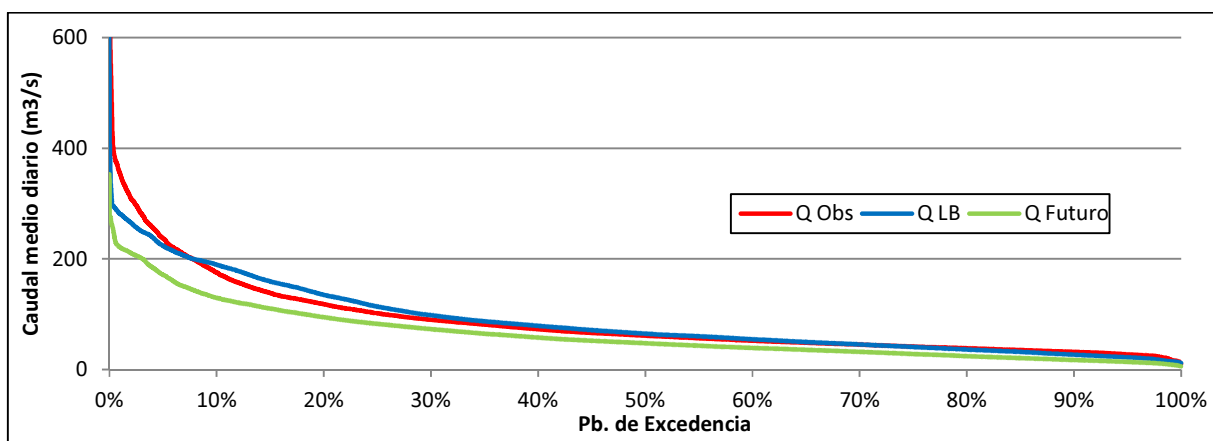


Figura 7-4. Curva de Duración Futuro Maipo en San Alfonso

Como se vio en el capítulo anterior, los caudales simulados fueron corregidos para que sean más representativos. Por esta razón, los caudales generados para el futuro se corregirán siguiendo las mismas ecuaciones mostradas anteriormente. En la Tabla 7.1 se presentan los valores de los caudales medios diarios máximos anuales para el período futuro (2040-2070)

Tabla 7.1. Caudales medios diarios máximos anuales (m3/s) Maipo en San Alfonso ordenados, futuro.

N	Pluvial		Nival		N	Pluvial		Nival	
	FUTURO	FUT COR	FUTURO	FUT COR		FUTURO	FUT COR	FUTURO	FUT COR
1	286.16	<b>779.65</b>	353.33	<b>389.26</b>	16	71.76	<b>63.17</b>	130.6	<b>167.51</b>
2	262.86	<b>667.61</b>	329.89	<b>365.92</b>	17	70.29	<b>61.45</b>	126.35	<b>163.27</b>
3	213.03	<b>427.95</b>	298.88	<b>335.05</b>	18	69.05	<b>60</b>	124.83	<b>161.76</b>
4	172.69	<b>233.93</b>	231.07	<b>267.54</b>	19	67.57	<b>58.28</b>	122.15	<b>159.09</b>
5	144.86	<b>100.07</b>	227.16	<b>263.65</b>	20	67.44	<b>58.13</b>	117.91	<b>154.87</b>
6	144.25	<b>97.16</b>	226.31	<b>262.8</b>	21	64.81	<b>55.05</b>	113.08	<b>150.06</b>
7	129.12	<b>130.13</b>	223.64	<b>260.14</b>	22	63.66	<b>53.71</b>	106.81	<b>143.83</b>
8	112.27	<b>110.47</b>	189.79	<b>226.44</b>	23	58.06	<b>47.18</b>	105.31	<b>142.33</b>
9	111.84	<b>109.96</b>	178.91	<b>215.6</b>	24	51.37	<b>39.37</b>	97.39	<b>134.45</b>
10	93.16	<b>88.15</b>	170.47	<b>207.2</b>	25	49.62	<b>37.32</b>	93.54	<b>130.61</b>
11	85.55	<b>79.26</b>	156.79	<b>193.58</b>	26	48.88	<b>36.46</b>	91.69	<b>128.77</b>
12	82.14	<b>75.29</b>	156.59	<b>193.38</b>	27	47.25	<b>34.56</b>	75.95	<b>113.1</b>
13	75.43	<b>67.46</b>	148.25	<b>185.09</b>	28	39.9	<b>25.98</b>	66.13	<b>103.33</b>
14	74.59	<b>66.47</b>	137.17	<b>174.05</b>	29	35.16	<b>20.44</b>	50.31	<b>87.58</b>
15	73.64	<b>65.36</b>	135.14	<b>172.03</b>	30	32.5	<b>17.34</b>	36.25	<b>73.58</b>

Se aprecia claramente que los caudales pluviales altos sufren un incremento importante, esto debido a la corrección que se efectuó para mantener la representatividad de los caudales a futuro.

En la Figura 7-5 se muestra el análisis de frecuencia de los caudales futuros en el período nival, y en la Figura 7-6 el análisis de frecuencia para los caudales futuros en el período pluvial. La distribución que mejor representa en ambos casos estos datos es la distribución Log-Pearson.

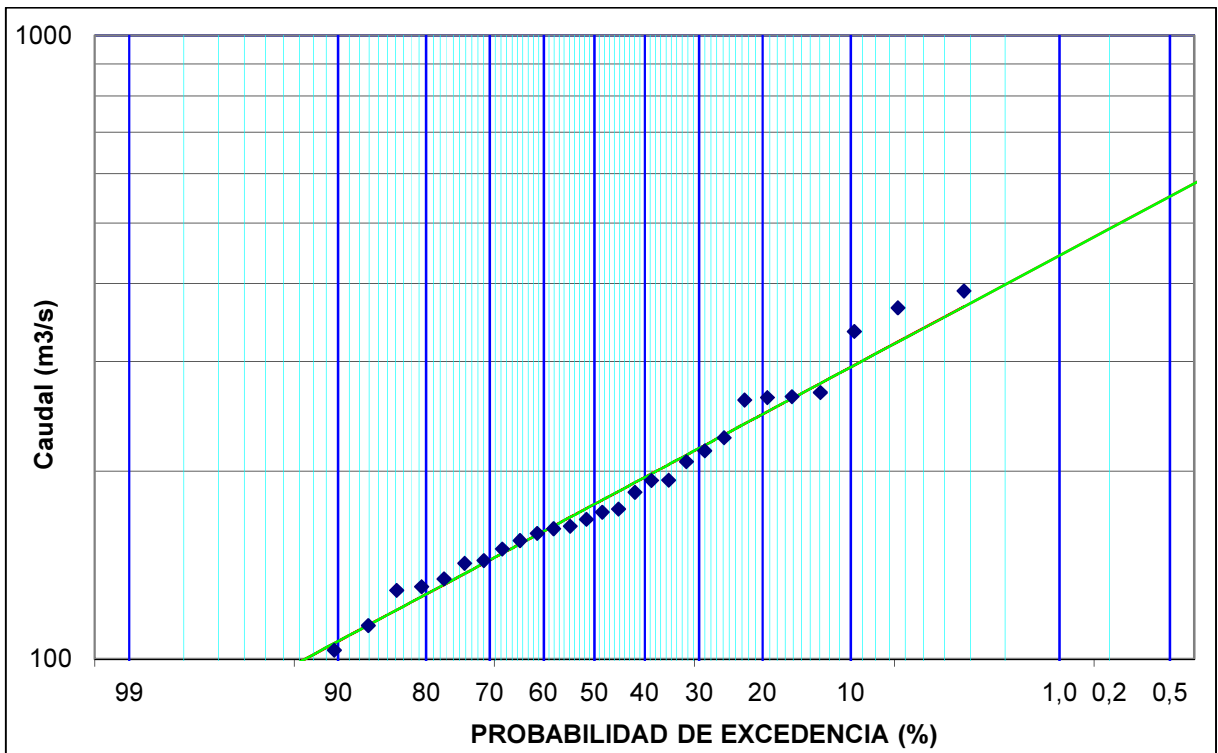


Figura 7-5. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período nival, Futuro (2040-2070).

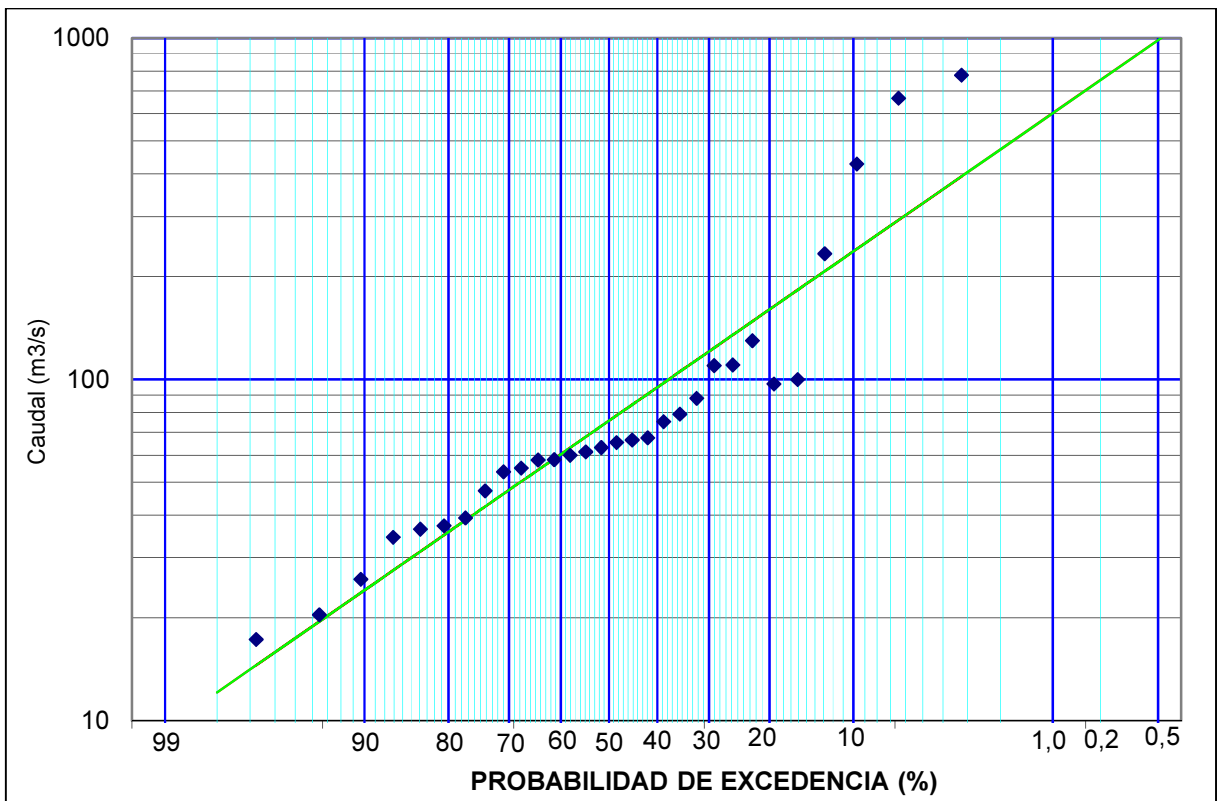


Figura 7-6. Distribución Log-Pearson para caudales medios diarios máximos anuales período pluvial, Futuro (2040-2070).

## CAPÍTULO 8. ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN PUNTO DE CONTROL

Para evaluar el riesgo de inundación en la comuna de Isla de Maipo, se utilizaron los caudales máximos instantáneos asociados a crecidas de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, separados en período nival y pluvial. Los caudales generados en los capítulos anteriores corresponden a los caudales medios diarios obtenidos del modelo hidrológico para la cuenca de Maipo en San Alfonso, por lo cual, habrá que llevarlos en primer lugar hacia Maipo en el Manzano y posteriormente hacia el punto de control ubicado en Maipo después del Río Angostura. En la Figura 8-1 se puede apreciar los puntos correspondientes a Maipo en San Alfonso (verde), Maipo en el Manzano (blanco) y Maipo después del RÍO Angostura (azul). En verde están los perfiles transversales a ser utilizados en el estudio.

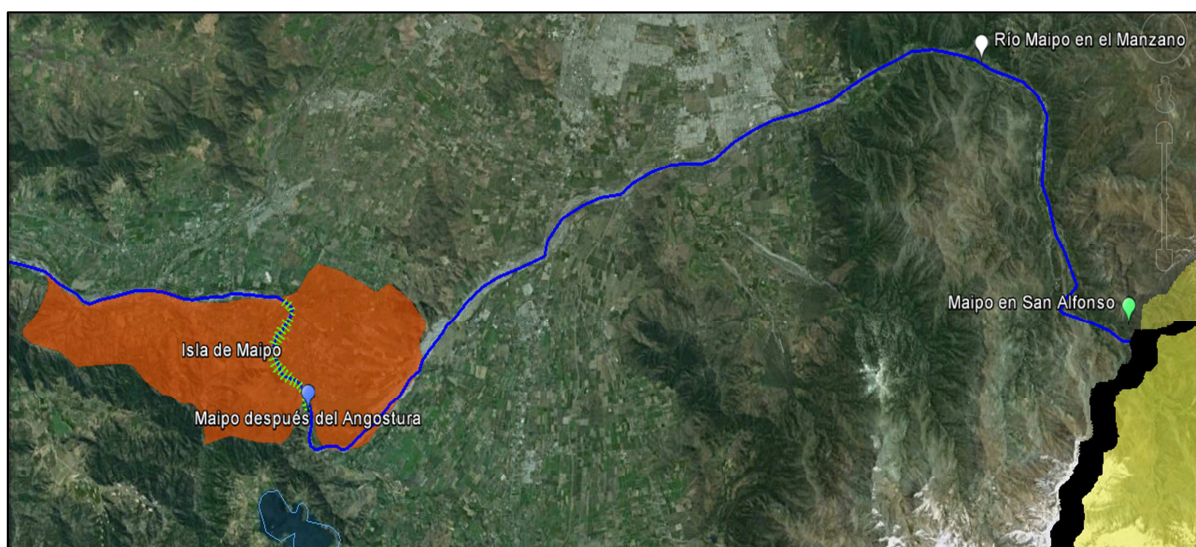


Figura 8-1. Punto de Control.

### 8.1 Caudales máximos instantáneos Maipo en el Manzano

Para poder determinar el caudal máximo instantáneo anual que escurre por Maipo en el Manzano se abordaron dos maneras posibles las cuales se detallan a continuación:

- I. Correlacionar los caudales medios diarios máximos anuales en Maipo en San Alfonso versus los caudales máximos instantáneos anuales en el mismo punto. Posteriormente correlacionar estos últimos caudales con los caudales máximos instantáneos en Maipo en el Manzano.
- II. Correlacionar los caudales medios diarios máximos anuales en Maipo en San Alfonso versus los mismos caudales en Maipo en el Manzano. Posteriormente correlacionar estos últimos caudales con los caudales máximos instantáneos en Maipo en el Manzano.

Para el régimen pluvial, las mejores correlaciones se dieron utilizando el primer procedimiento, mientras que para el régimen nival se optó por el segundo.

En la Tabla 8.1 se presentan los caudales observados medios diarios máximos anuales para la estación Maipo en el Manzano en el período del estudio (1982-2010), estos caudales serán



utilizados para generar correlaciones que permitan obtener los caudales máximos instantáneos en dicho punto.

**Tabla 8.1. Caudales medios diarios observados máximos anuales (m<sup>3</sup>/s) estación Maipo en el Manzano (1982-2010).**

N	Pluvial	Nival	N	Pluvial	Nival
1	2542	775	15	177	320
2	1135	639	16	166	313
3	599	525	17	159	262
4	595	523	18	155	252
5	418	518	19	132	250
6	417	474	20	123	250
7	365	443	21	119	202
8	352	441	22	112	196
9	332	433	23	95	195
10	313	429	24	95	189
11	258	410	25	88	177
12	245	350	26	85	158
13	192	338	27	84	135
14	185	330	28	79	102

En la Tabla 8.2 se muestran los caudales máximos instantáneos anuales observados tanto en Maipo en San Alfonso como en Maipo en el Manzano para el período en estudio.

**Tabla 8.2. Caudales máximos instantáneos anuales observados (m<sup>3</sup>/s) Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano (1982-2010).**

N	Maipo en San Alfonso		Maipo en el Manzano		N	Maipo en San Alfonso		Maipo en el Manzano	
	Pluvial	Nival	Pluvial	Nival		Pluvial	Nival	Pluvial	Nival
1	470	838	740	1430	15	254	369	127	242
2	455	712	710	1112	16	246	333	123	214
3	449	678	511	816	17	235	299	113	188
4	435	621	317	750	18	232	293	110	187
5	395	597	252	726	19	187	275	104	167
6	388	572	240	601	20	185	268	97	166
7	374	517	226	559	21	178	264	94	149
8	369	494	209	548	22	176	233	83	146
9	334	474	203	518	23	176	226	78	143
10	312	470	177	472	24	167	219	71	118
11	310	435	174	448	25	165	201	71	113
12	273	404	170	444	26	150	194	68	101
13	263	404	145	282	27	107	155	66	94
14	261	384	141	248	28	103	135	61	94

En la Figura 8-2 se muestran las correlaciones de caudales medios diarios máximos anuales entre Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano (a) y la correlación entre los caudales medios diarios de Maipo en el Manzano y los caudales máximos instantáneos en el mismo punto (b), en período nival.



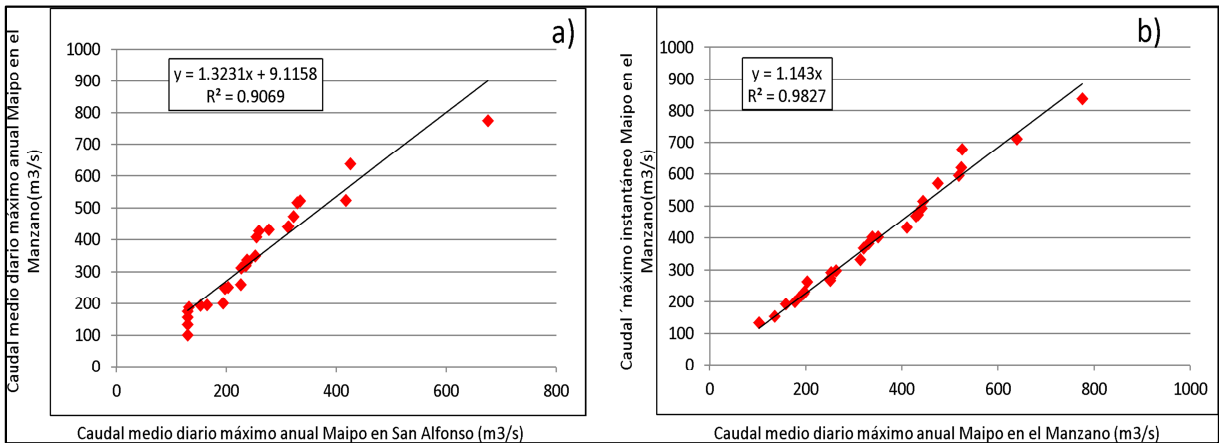


Figura 8-2. Correlaciones para obtener el caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano, período nival (1982-2010).

De la misma forma, en la Figura 8-3 se muestra las correlaciones entre caudales medios diarios máximos anuales y caudales máximos instantáneos en Maipo en San Alfonso (a) y la correlación entre los caudales máximos instantáneos entre Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano (b), en el período pluvial.

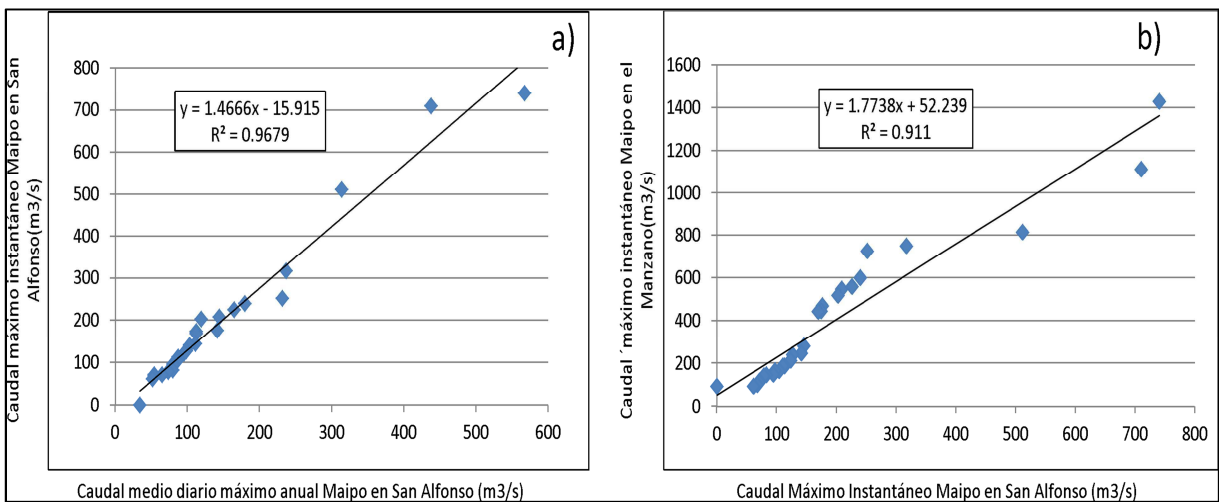


Figura 8-3. Correlaciones para obtener el caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano, período pluvial (1982-2010).

A través del análisis de frecuencia realizado para Maipo en San Alfonso en período nival y pluvial se obtienen los caudales asociados a los distintos períodos de retorno, tanto en el período de línea base (1982-2010) como futuro (2040-2070). Utilizando además las correlaciones mostradas anteriormente, se obtiene el caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano para ambos períodos. El caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano para el escenario futuro en el período nival se muestra en la Tabla 8.3, y para el período pluvial en la Tabla 8.4. Los caudales medios diarios en Maipo en San Alfonso para el escenario futuro, tanto nival como pluvial, son obtenidos a partir del análisis de frecuencia realizado en el capítulo anterior.

**Tabla 8.3. Caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano período nival, escenario futuro (2040-2070).**

T	Pb	CAUDAL MEDIO DIARIO MAIPO EN SAN ALFONSO	CAUDAL MEDIO DIARIO MAIPO EN EL MANZANO	CAUDAL MAXIMO INSTANTANEO MAIPO EN EL MANZANO
200	0.5	493	662	<b>756</b>
100	1	446	599	<b>685</b>
50	2	400	538	<b>615</b>
25	4	354	478	<b>546</b>
10	10	294	398	<b>455</b>
5	20	247	336	<b>384</b>
2	50	177	243	<b>278</b>

**Tabla 8.4. Caudal máximo instantáneo en Maipo en el Manzano período pluvial, escenario futuro (2040-2070).**

T	Pb	CAUDAL MEDIO DIARIO MAIPO EN SAN ALFONSO	CAUDAL MAX. INSTANTÁNEO MAIPO EN SAN ALFONSO	CAUDAL MAXIMO INSTANTANEO MAIPO EN EL MANZANO
200	0.5	1904	2776	<b>4976</b>
100	1	1213	1762	<b>3178</b>
50	2	766	1107	<b>2016</b>
25	4	478	685	<b>1267</b>
10	10	249	349	<b>671</b>
5	20	146	198	<b>404</b>
2	50	64	79	<b>192</b>

## 8.2 Caudales máximos instantáneos Río Maipo después del Río Angostura

El punto de control es el caudal con el cual se modelaron los mapas de riesgo de inundación. Este punto se ubica después de la confluencia de los Ríos Maipo y el Río Angostura. Por esta razón, el caudal en Río Maipo después del Río Angostura corresponderá a la suma de ambos ríos.

Para esto fue necesario determinar el caudal en el Río Maipo Antes de Río Angostura y el caudal del Río Angostura.

### 8.2.1 Río Maipo antes de Río Angostura

Para obtener el caudal máximo instantáneo en el Río Maipo antes junta con el Río Angostura en régimen pluvial, simplemente se realizó una transposición de caudales por unidad de área a través de la Ecuación 8.1 Las áreas de las cuencas se encuentran en la Tabla 8.5.

$$Q_{antesAngostura} = \frac{Q_{Manzano}}{Area_{Manzano}} * Area_{antesAngostura} \quad \text{Ecuación 8-1}$$

Donde

$$Q_{antesAngostura} = \text{Cudal Río Maipo antes junta con Río Angostura} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Q_{Manzano} = \text{Caudal Río Maipo en el Manzano} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$Area_{Manzano} = Area\ aportante\ a\ Río\ Maipo\ en\ el\ Manzano [Km^2]$

$Area_{AntesAngostura} = Area\ aportante\ a\ Río\ Maipo\ antes\ junta\ con\ Río\ Angostura [Km^2]$

**Tabla 8.5. Área cuencas Maipo en el Manzano y Maipo antes del Angostura**

Área	Km2
Maipo en el Manzano	4876.5
Maipo antes junta Río Angostura	5570.8

Por otra parte, para obtener el caudal máximo instantáneo en el Río Maipo antes junta con Río Angostura en régimen nival, se realizó una transposición de caudales por unidad de área multiplicado por el rendimiento hídrico de la cuenca, el cual está definido como el cociente entre caudal y la multiplicación del área y la precipitación en la cuenca. La Ecuación 8.2 muestra la fórmula con que se determinó el caudal en dicho punto.

$$Q_{antesAngostura} = \frac{Q_{Manzano}}{Area_{Manzano}} * Area_{antesAngostura} * \frac{\eta_{antesAngostura}}{\eta_{Manzano}} \quad Ecuación\ 8-2$$

Donde

$$\eta_{antesAngostura} = \frac{Q_{antes} [\frac{m^3}{s}]}{A [Km^2] \times Pp [mm]} \quad Ecuación\ 8-3$$

En la Tabla 8.6 se presentan los rendimientos hídricos para ambas cuencas. Los valores fueron obtenidos del Diagnóstico Plan Maestro Río Maipo y sus Afluentes (A&C, 2008).

**Tabla 8.6. Rendimiento hídrico Maipo en el Manzano y Maipo antes de Angostura**

Rendimiento Hídrico Nival (1e3/s)	
Maipo en el Manzano	0.025
Maipo debajo de Angostura	0.007

Finalmente, los caudales en el escenario futuro son los presentados en la Tabla 8.7.

**Tabla 8.7. Caudales máximos instantáneos (m3/s) escenario futuro Maipo antes de Angostura**

T	Pb	CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO MAIPO EN ANGOSTURA PERÍODO NIVAL	CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO MAIPO EN ANGOSTURA PERÍODO PLUVIAL
200	0.5	230	5685
100	1	208	3631
50	2	187	2303
25	4	166	1447
10	10	138	766
5	20	116	462
2	50	84	219

## 8.2.2 Río Angostura

Para obtener los caudales en el escenario futuro del Río Angostura antes de la desembocadura, se relacionaron los caudales para los distintos períodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años) entre el Río Maipo antes de la junta con el Río Angostura y el Río Angostura, tanto como para régimen nival como pluvial. En la Figura 8-4 se presenta la correlación entre el caudal máximo instantáneo para los distintos períodos de retorno entre Maipo antes de la junta con Río Angostura y Río Angostura en desembocadura, para el período nival (a), y para el período pluvial (b). Los caudales del Río Angostura fueron obtenidos del Diagnóstico Plan Maestro Río Maipo y sus Afluentes (A&C, 2008), para mantener la homogeneidad de las correlaciones.

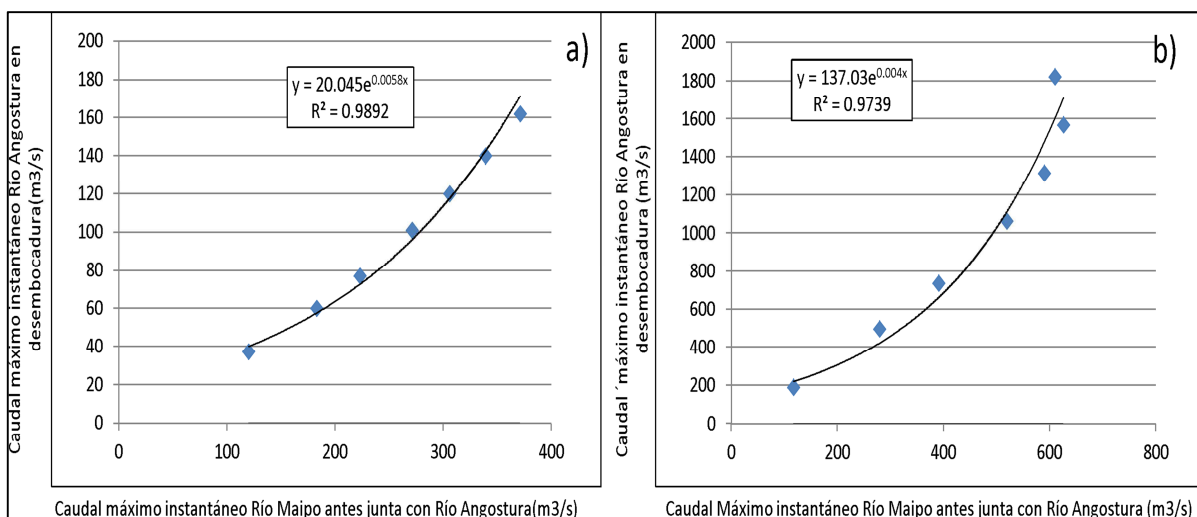


Figura 8-4. Correlación Maipo antes de Angostura versus Río Angostura

Utilizando estas correlaciones, se determinó el caudal en Río Angostura. Finalmente, y a modo de resumen se presentan los caudales obtenidos en este estudio y como referencia se muestran los caudales obtenidos en el estudio Diagnóstico Plan Maestro Río Maipo y sus Afluentes (A&C, 2008) para el período 1950-2006, en el cual se ha utilizado una distribución Log-Pearson.

Tabla 8.8. Caudales generados (m3/s) estudio A&C

Caudales generados estudio A&C								
T (Años)	Maipo El Manzano		Maipo antes Angostura		Angostura Desembocadura		Maipo en Punto de Control	
	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival
200	2093	1157	2703	371	1823	162	<b>4526</b>	<b>533</b>
100	1561	1010	2187	339	1569	140	<b>3756</b>	<b>479</b>
50	1149	874	1739	306	1316	120	<b>3055</b>	<b>426</b>
25	830	746	1349	271	1065	101	<b>2414</b>	<b>372</b>
10	519	589	910	223	738	77	<b>1648</b>	<b>300</b>
5	346	476	625	183	496	60	<b>1121</b>	<b>243</b>
2	175	323	292	120	190	37	<b>482</b>	<b>157</b>

**Tabla 8.9. Caudales generados (m3/s) Línea Base (1982-2010) (elaboración propia)**

Caudales generados Línea Base								
T (Años)	Maipo El Manzano		Maipo antes Angostura		Angostura Desembocadura		Maipo en Punto de Control	
	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival
200	2487	1189	2841	361	565	163	3406	524
100	1905	1038	2177	315	406	125	2582	440
50	1446	899	1652	273	312	98	1964	371
25	1085	770	1239	234	254	78	1493	312
10	721	613	824	186	207	59	1031	245
5	513	501	586	152	184	48	769	201
2	296	352	338	107	162	37	500	144

**Tabla 8.10. Caudales generados (m3/s) escenario Futuro (2040-2070) (elaboración propia)**

Caudales generados FUTURO								
T (Años)	Maipo El Manzano		Maipo antes Angostura		Angostura Desembocadura		Maipo en Punto de Control	
	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival	Q Pluvial	Q Nival
200	4976	756	5685	230	2331	76	<b>8016</b>	<b>306</b>
100	3178	685	3631	208	837	67	<b>4468</b>	<b>275</b>
50	2016	615	2303	187	432	59	<b>2735</b>	<b>246</b>
25	1267	546	1447	166	282	52	<b>1729</b>	<b>218</b>
10	671	455	766	138	201	45	<b>967</b>	<b>183</b>
5	404	384	462	116	172	39	<b>634</b>	<b>156</b>
2	192	278	219	84	153	33	<b>372</b>	<b>117</b>

Se aprecia que los caudales obtenidos por A&C son más elevados que los generados en este informe, sobre todo para períodos de retornos altos. Esto se puede deber básicamente a que el período de estudio es diferente y también a que a pesar de las correcciones los caudales altos obtenidos de la modelación fueron levemente subestimados. Los caudales de entrada al programa HEC-RAS son los proporcionados por el estudio citado (Tabla 8.8) y los generados para el escenario futuro en este informe (Tabla 8.10).

## CAPÍTULO 9. GENERACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN

La elaboración de mapas de inundación es fundamental para el ordenamiento y planificación de un poblado o ciudad. Debido a la información que otorgan en relación a las áreas propensas a estar inundadas cuando crecidas asociadas a distintos períodos de retorno suceden. En este capítulo se explica de qué manera se obtuvieron los mapas de inundación, resultado final de esta memoria.

### 9.1 Recopilación de Información

Para la confección de estos mapas se requiere gran cantidad de información. De partida se necesita la cartografía de la comuna de Isla de Maipo, referente a caminos, lagos, carreteras, líneas férreas, puentes, áreas verdes, etc. En el estudio realizado en 2008 por A&C Consultores, Diagnóstico Plan Maestro Río Maipo y sus Afluentes, Región Metropolitana-Dirección de Obras Hidráulicas-MOP, se recopiló todos estos antecedentes, y en formato digital, como archivos *shapefile* que son leídos por el programa ArcGis, que es con el cual se confeccionaron los mapas. Específicamente, en base a la cartografía digital del Instituto Geográfico Militar en escala 1:50.000 se extrajo los niveles de información que se muestran en la Tabla 9.1. La base cartográfica respeta el sistema de proyección original de la fuente de información, la cual corresponde a la proyección Universal Transversal de Mercator, Datum WGS 1984.

Tabla 9.1. Niveles de Información de la base cartográfica del SIG

Niveles de Información
Curvas de nivel
Red Vial
Red Ferroviaria
Hidrografía Principal
Lagos, Lagunas y Embalses
Límite urbano
Límites comunales
Coordenadas UTM
Textos

Además, se requiere información acerca del cauce. En el mismo estudio se realizó una campaña topográfica para determinar las cotas del río. El tramo en estudio cuenta con 27 perfiles transversales. Que están distanciados entre ellos aproximadamente cada 300 metros. También se necesitó un archivo en formato Red Irregular de Triángulo (TIN), el cual posee información del terreno y es sobre el cual se creará el área de inundación. Este archivo no es posible obtenerlo a partir de la cartografía proporcionada por el IGM, por lo que se creó a partir de curvas de nivel generadas desde los puntos obtenidos en los perfiles transversales. En el Anexo digital de este informe se presentan los perfiles transversales para el tramo en estudio.

Por último, se extrajo una imagen satelital desde Google Earth con el área en estudio para apoyar y mejorar la visualización de los mapas. Esta imagen es georeferenciada para que aparezca en conjunto con los otros elementos mencionados anteriormente.

## 9.2 Modelación del Eje Hidráulico

La modelación del flujo del cauce en la comuna de Isla de Maipo se realizó utilizando el programa HEC-RAS. Los pasos a seguir son básicamente estándar, y se detallan a continuación:

- I. Una vez en el programa HEC-RAS, se debe definir el río y su geometría, la cantidad de secciones transversales, los bordes del río y los coeficientes de Manning del cauce, los cuales adoptan el valor de 0,06 para planicies y 0,037 para cauces. En la Figura 9-1 se muestra el esquema del río y los perfiles transversales, junto con el detalle de uno de ellos.

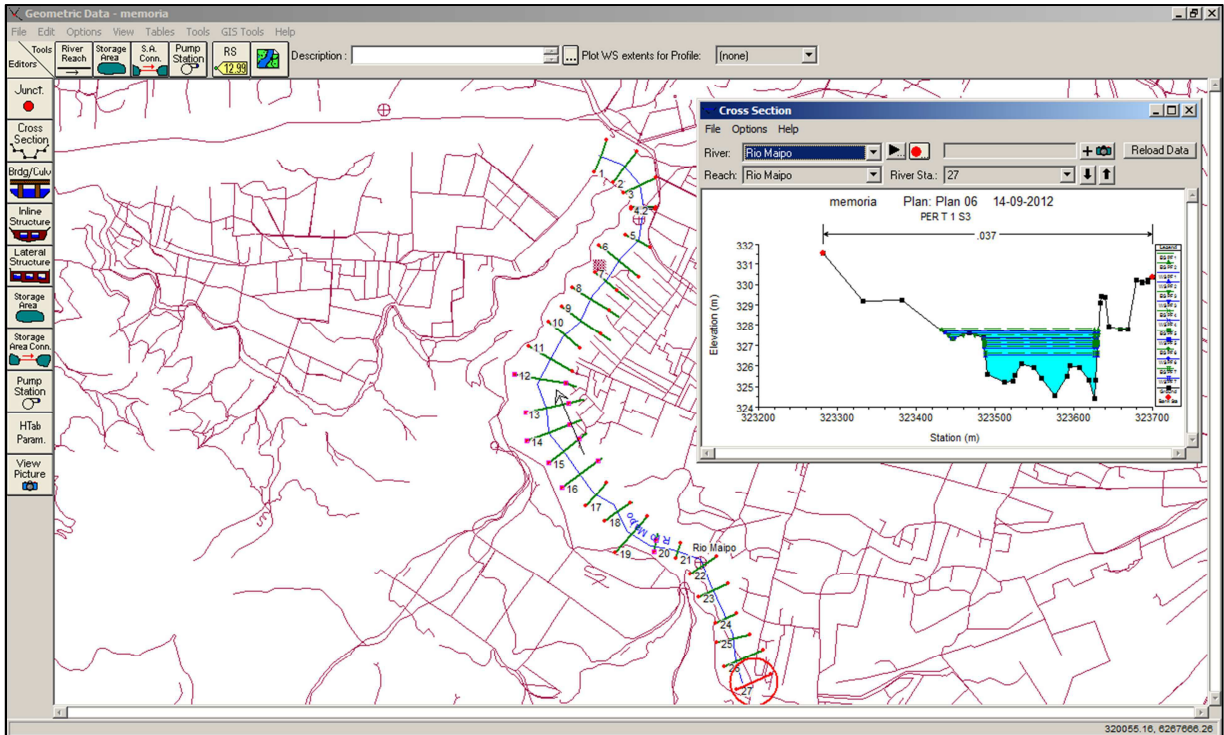


Figura 9-1. Esquema Río HEC-RAS

También en esta parte, se debe definir las áreas de planicies y de cauce principal. Además de indicar si existen zonas de obstrucción o con diques. Todo esto se ha realizado según el estudio realizado por A&C Consultores mencionado anteriormente, en el cual se ha recabado la información suficiente como para determinar dichas observaciones.

- II. Posteriormente, se debe definir el tipo de análisis, el cual para este estudio corresponde a un análisis de flujo uniforme. En esta etapa se ingresan los catorce caudales a ser modelados (siete en línea base y siete caudales futuros, asociados a los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años). Además se incluye la condición de borde, la cual corresponde a altura normal aguas arriba, ingresando una pendiente igual a  $S=0,0035$ . Cabe recordar que, a pesar de modelar con los catorce caudales mencionados, sólo se realizó la confección de los mapas para los caudales con período de retorno de 2 y 200 años, tanto en régimen nival como pluvial, para línea base y futuro, siendo en total ocho mapas a presentar. Sin embargo, en el anexo se encuentran el resto de los mapas con los distintos períodos de retorno asociados a otros caudales.

- III. Luego se computa el análisis donde se ingresan los archivos de geometría y análisis de flujo creados anteriormente. Además se debe indicar el régimen del flujo, el cual corresponde a un flujo subcrítico. Como resultado se obtiene la cota de agua en cada perfil para los distintos caudales analizados. En este paso se puede ver las secciones de los ríos, el río modelado completamente para el caudal deseado, etc. Los resultados de la superficie de agua se pueden exportar, para posteriormente sean leídos directamente en ArcGis.
- IV. Utilizando el programa HEC-GEORAS, es posible transferir los datos obtenidos desde HEC-RAS a ArcGis. Además utilizando el archivo de terreno en formato TIN que se ha creado a partir de los puntos de los perfiles transversales, es posible generar el área de inundación. Este proceso se repite para cada uno de los caudales modelados en que se crearon los mapas. En la Figura 9-2 se presenta la interfaz del programa ArcGis, desde donde se extrae el área de inundación a partir de los datos entregados por el software HEC-RAS.
- V. Finalmente, una vez que se tienen todos los elementos, se deben agrupar e incorporar en el formato de mapa deseado. A la imagen obtenida desde Google Earth de fondo, y la cartografía recopilada, más el área de inundación recientemente generada se le suma la elaboración de la simbología y los márgenes para posteriormente poder ser impreso. En el anexo digital se encuentran los mapas tanto en formato pdf como en formato de imagen. También se encuentra el archivo en ArcGis con los elementos.

Finalmente, en la Tabla 9.2 se presenta un resumen de lo mapas generados asociado a la figura correspondiente.

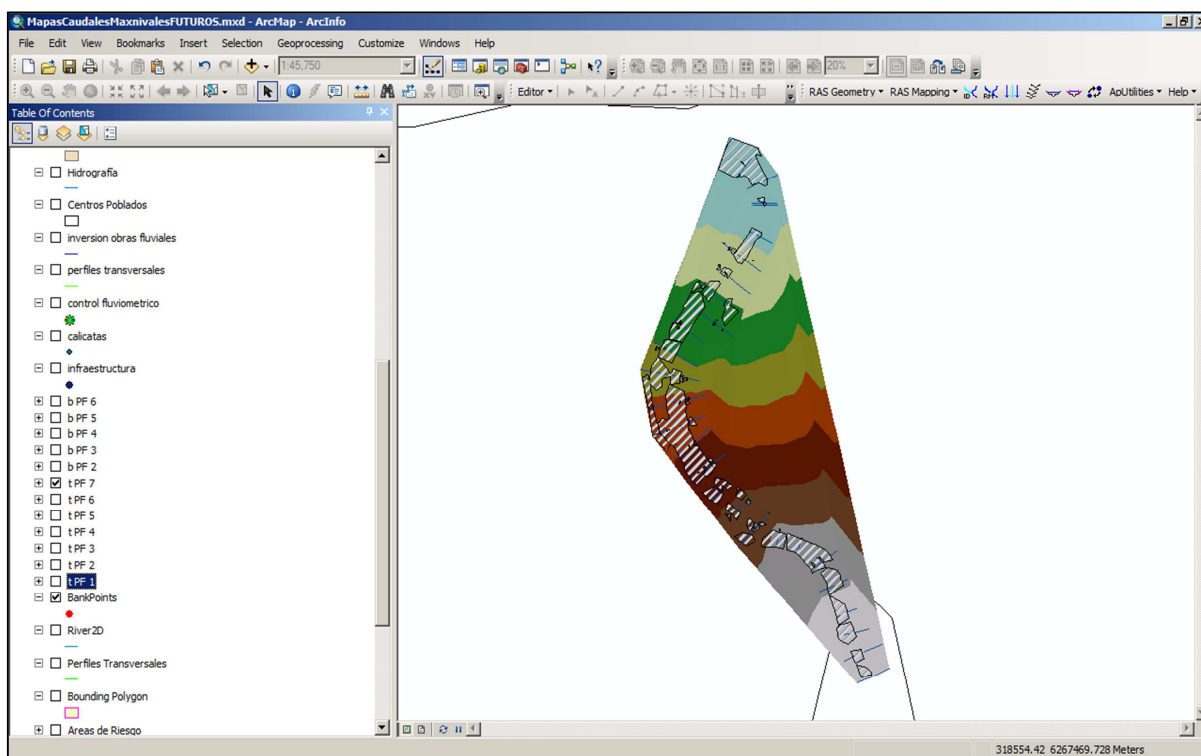


Figura 9-2. Creación área de inundación



**Tabla 9.2. Mapas Elaborados**

Escenario	T (Años)	Mapa	Figura
Línea Base	2	Pluvial	Figura 9.3
		Nival	Figura 9.4
	200	Pluvial	Figura 9.5
		Nival	Figura 9.6
Escenario Futuro	2	Pluvial	Figura 9.7
		Nival	Figura 9.8
	200	Pluvial	Figura 9.9
		Nival	Figura 9.10

En las conclusiones se analizan los resultados obtenidos tanto de los mapas como de las proyecciones obtenidas del modelo hidrológico.

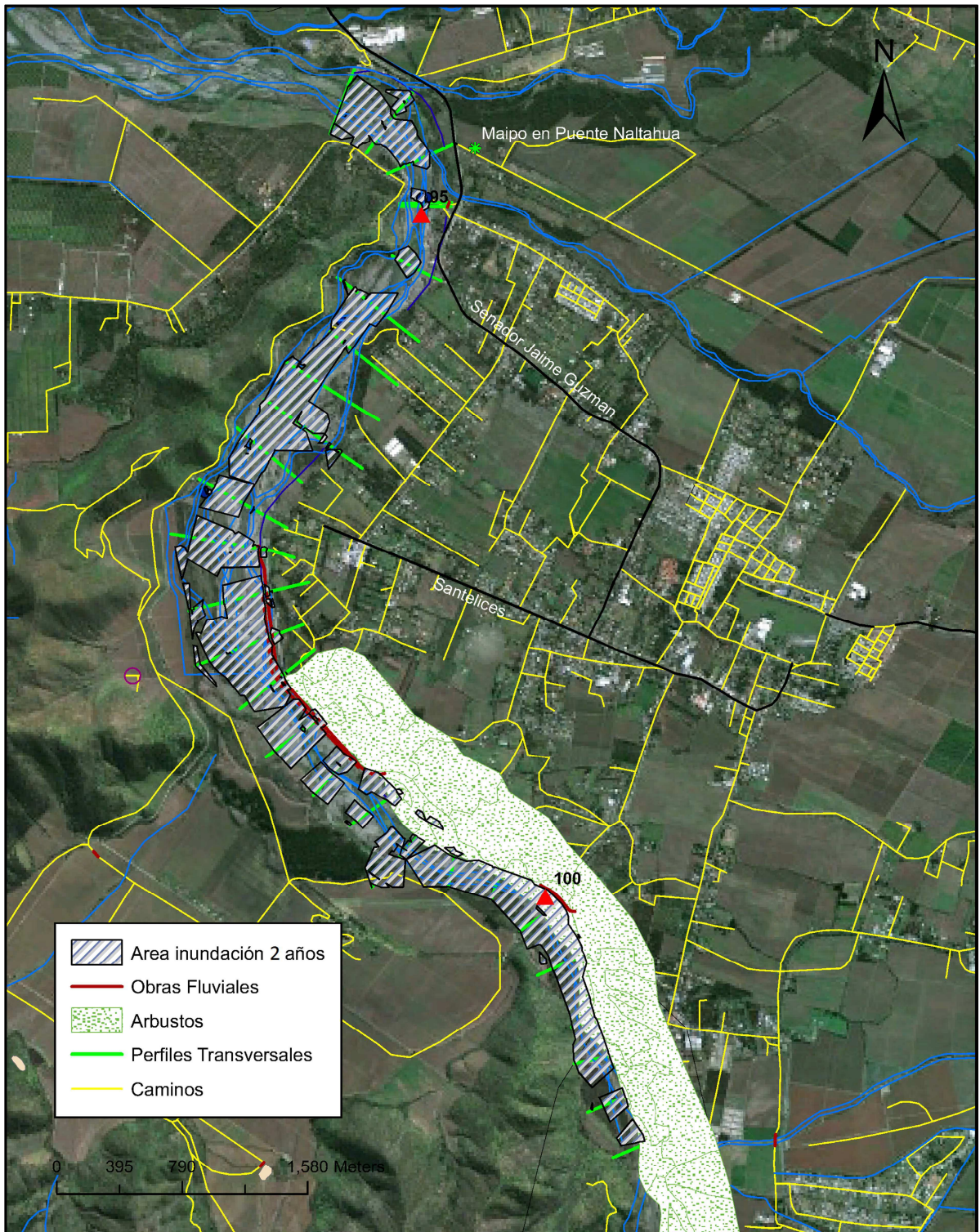


Figura 9-3. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años régimen pluvial, línea base



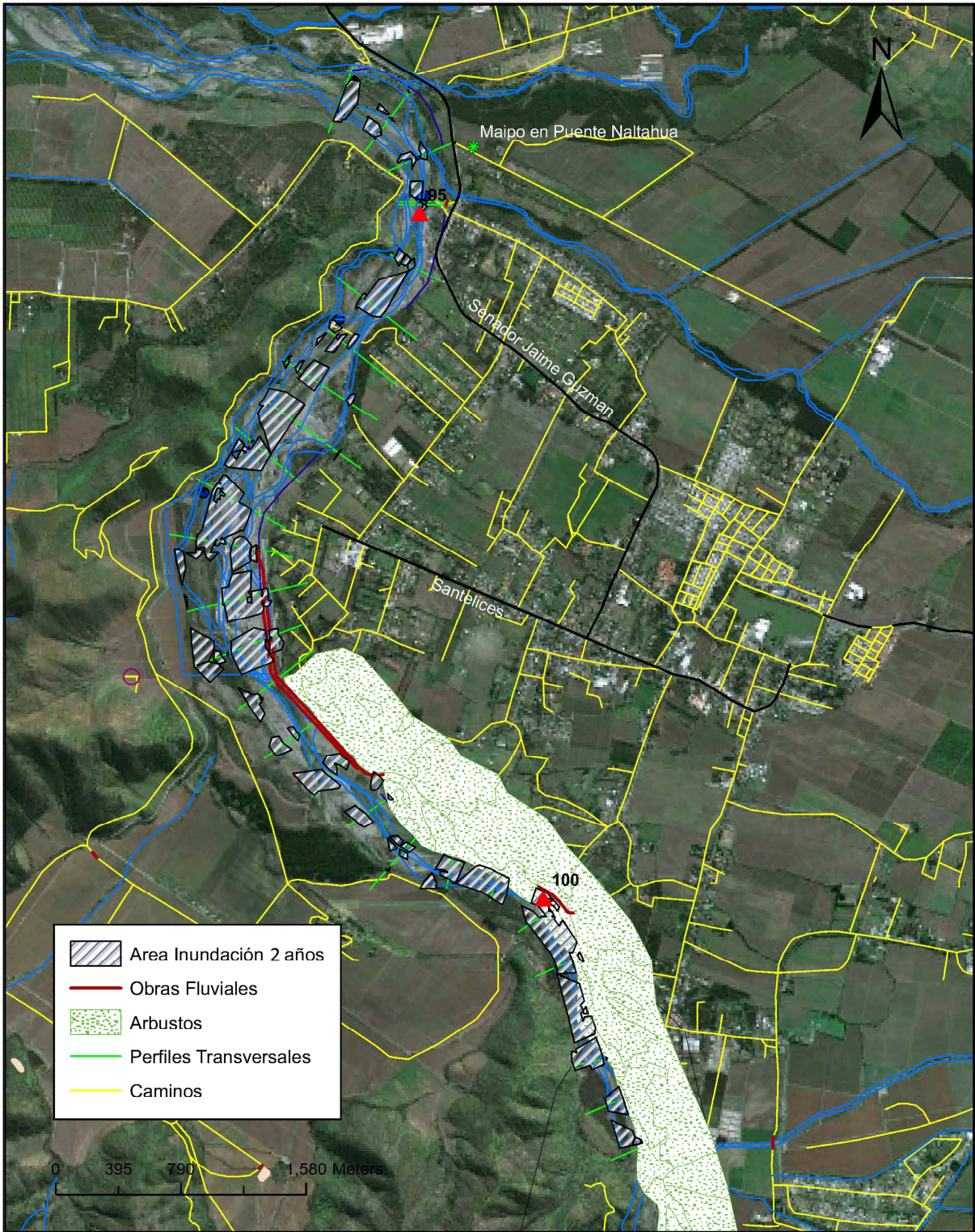


Figura 9-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen nival, línea base



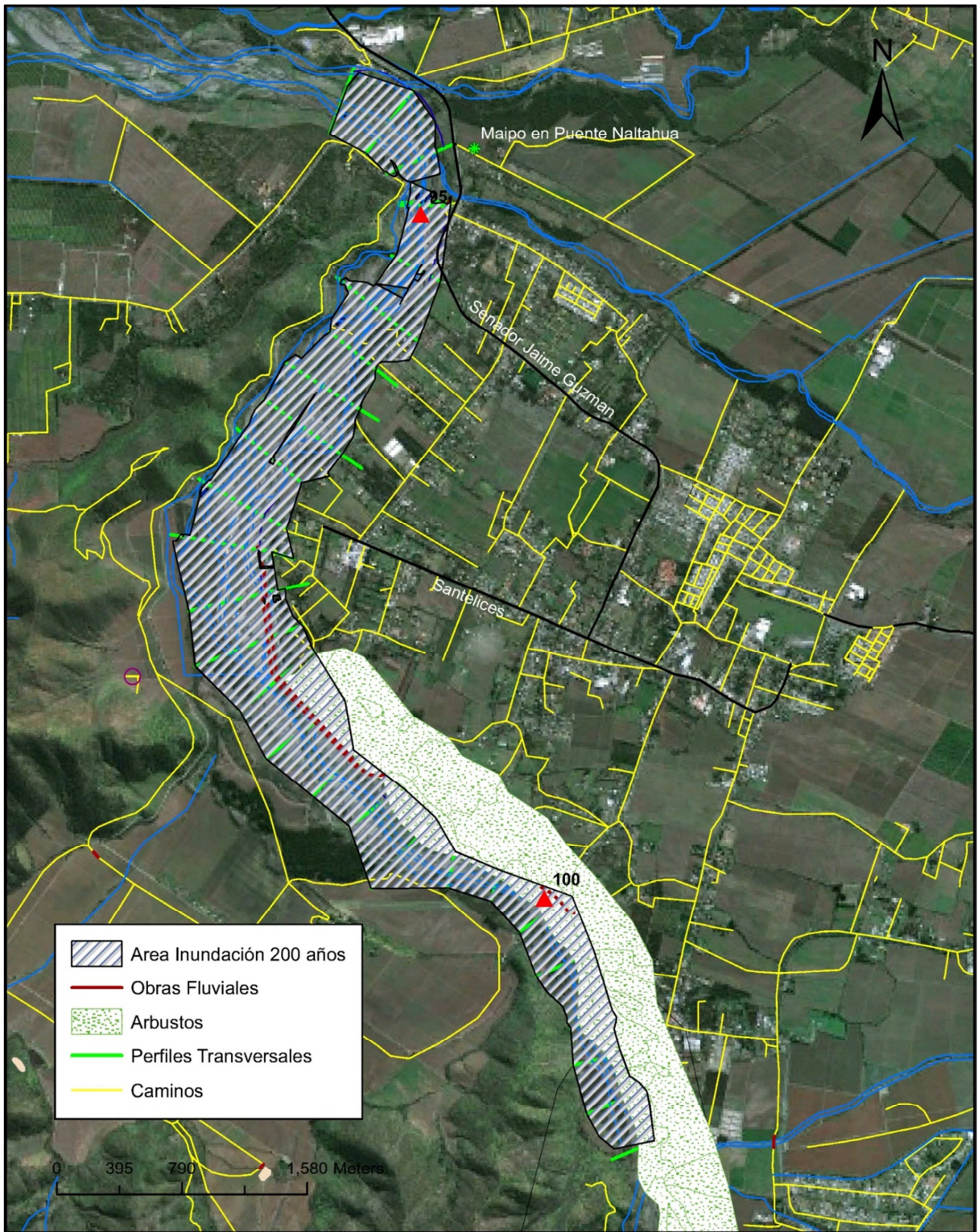


Figura 9-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen pluvial, línea base



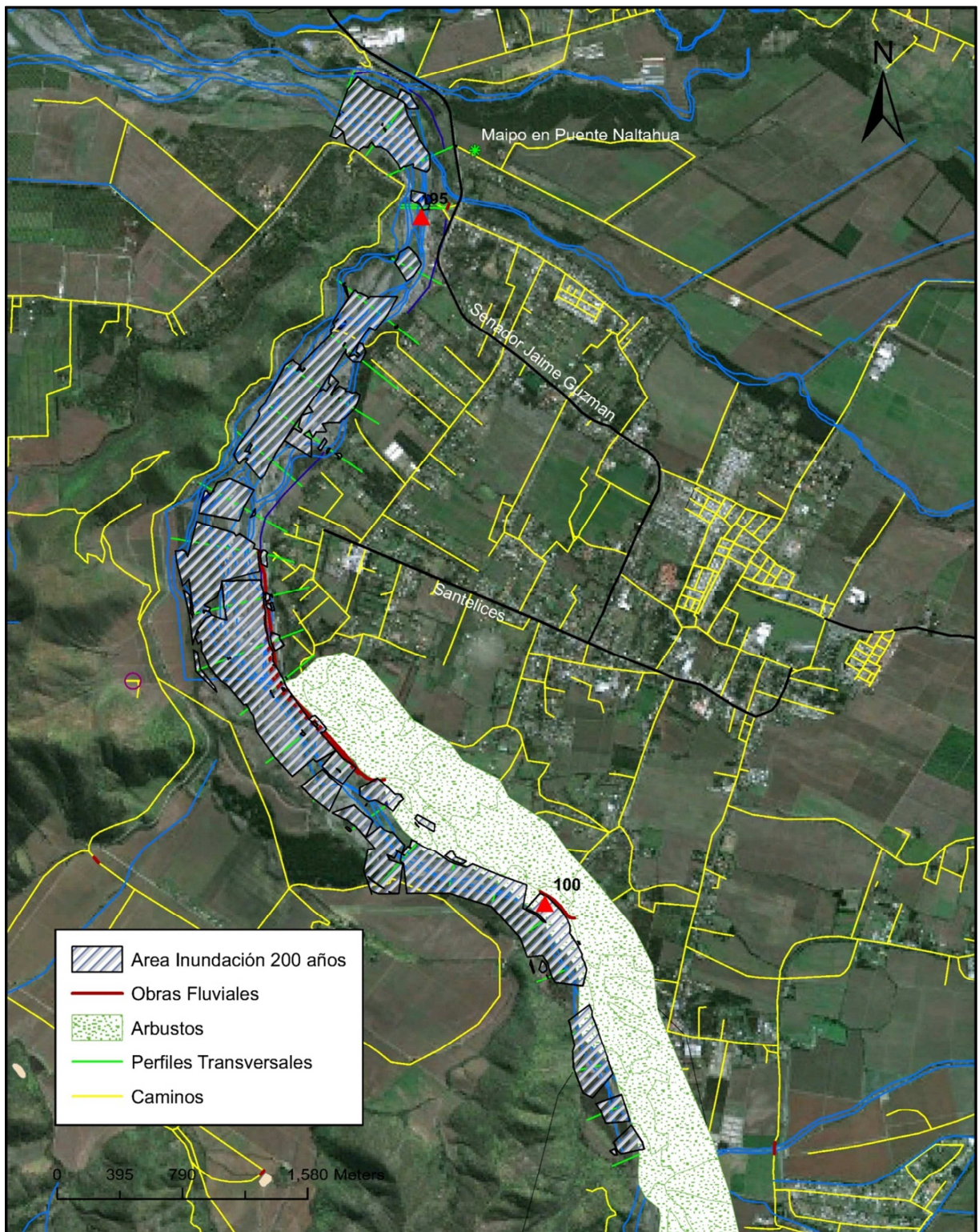


Figura 9-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen nival, línea base.



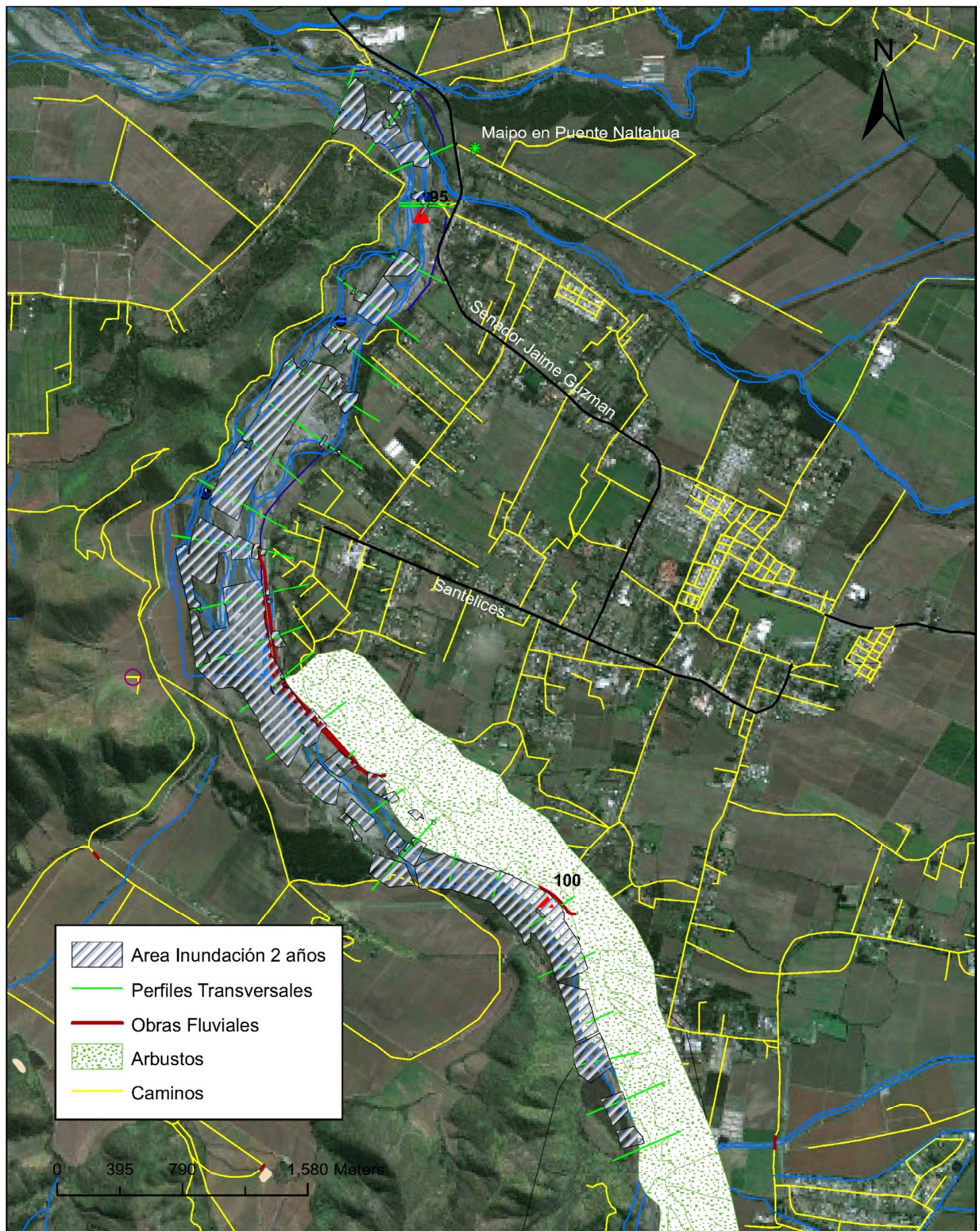


Figura 9-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen pluvial, escenario futuro.



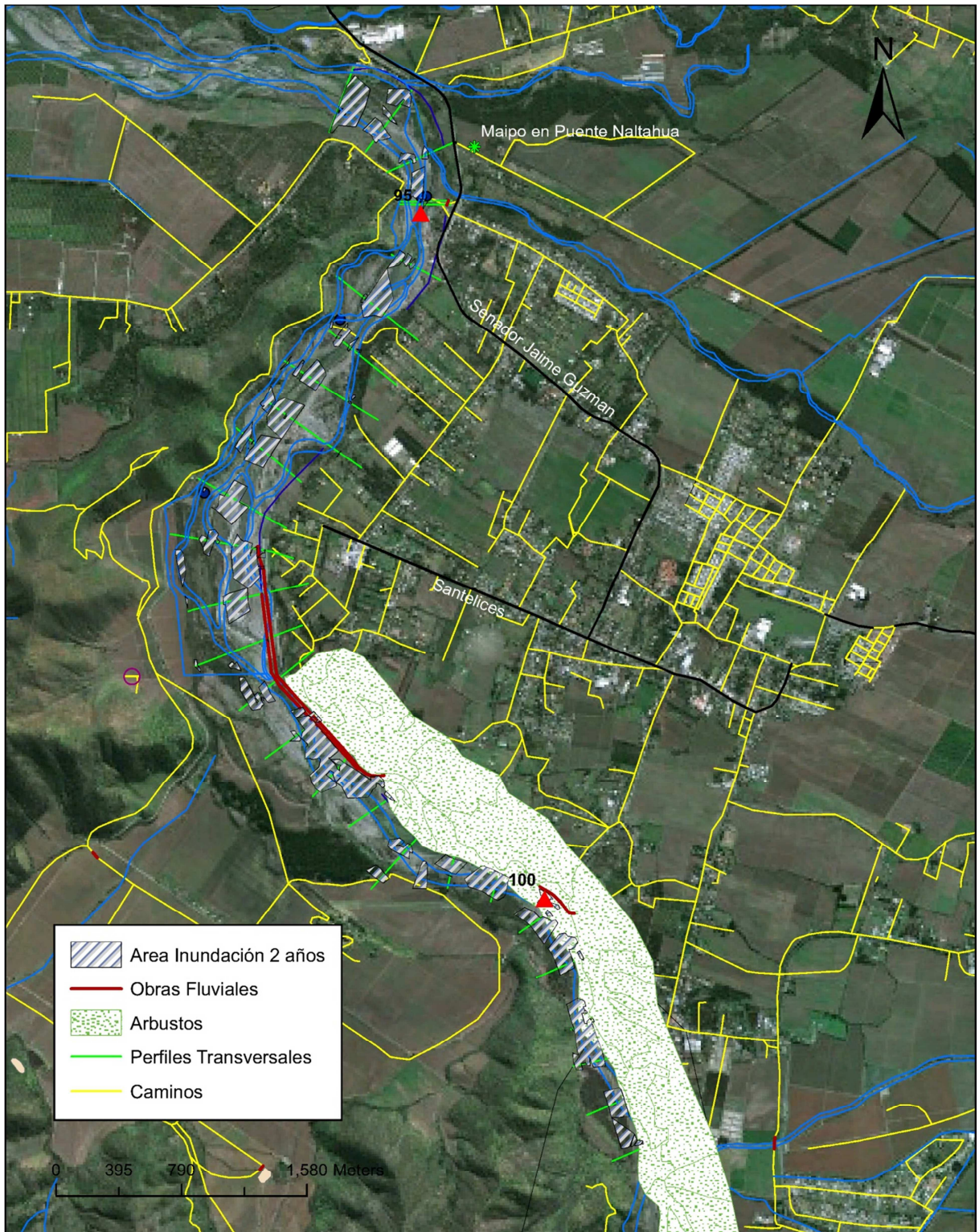


Figura 9-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 2 años, régimen nival, escenario futuro.



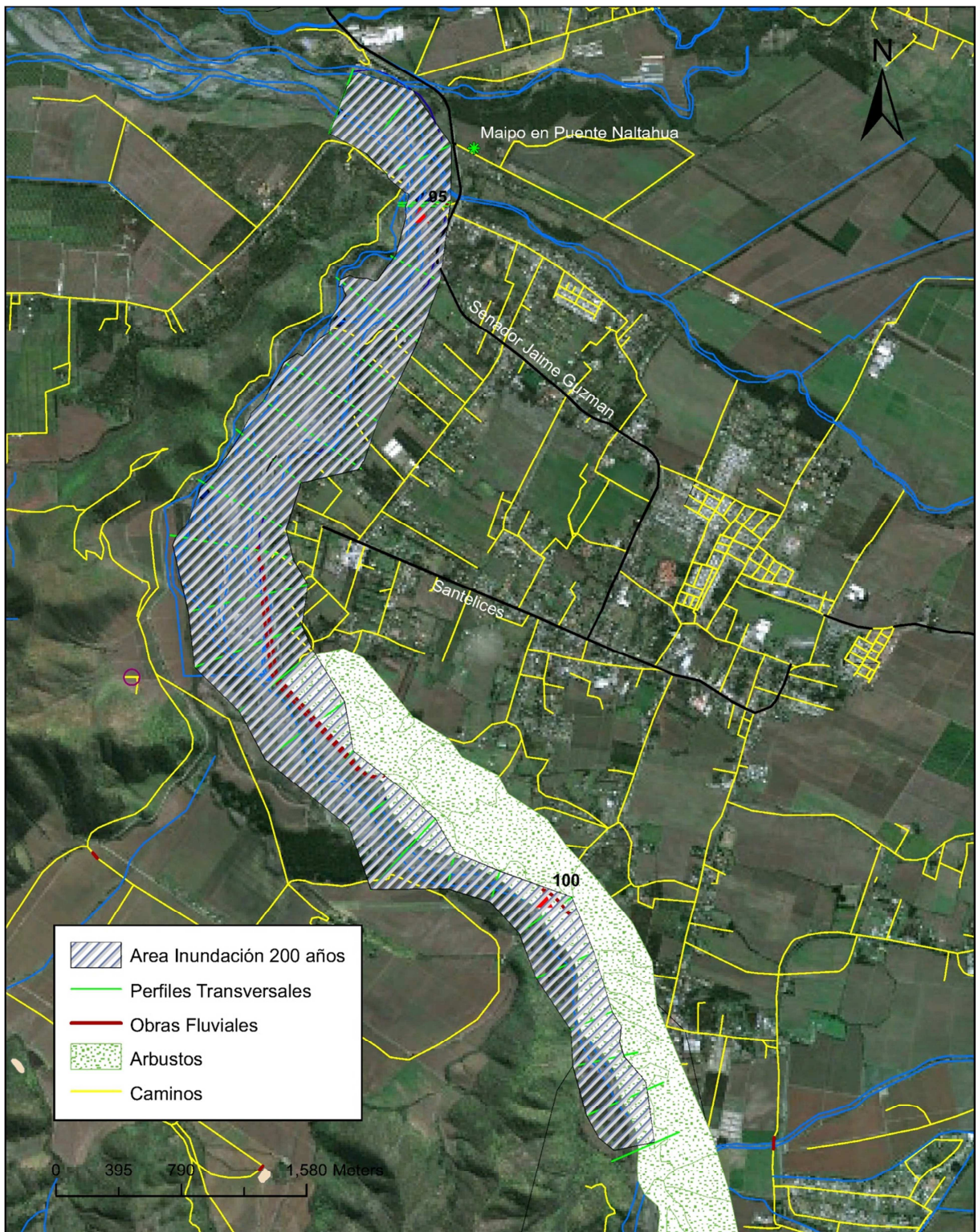


Figura 9-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen pluvial, escenario futuro.



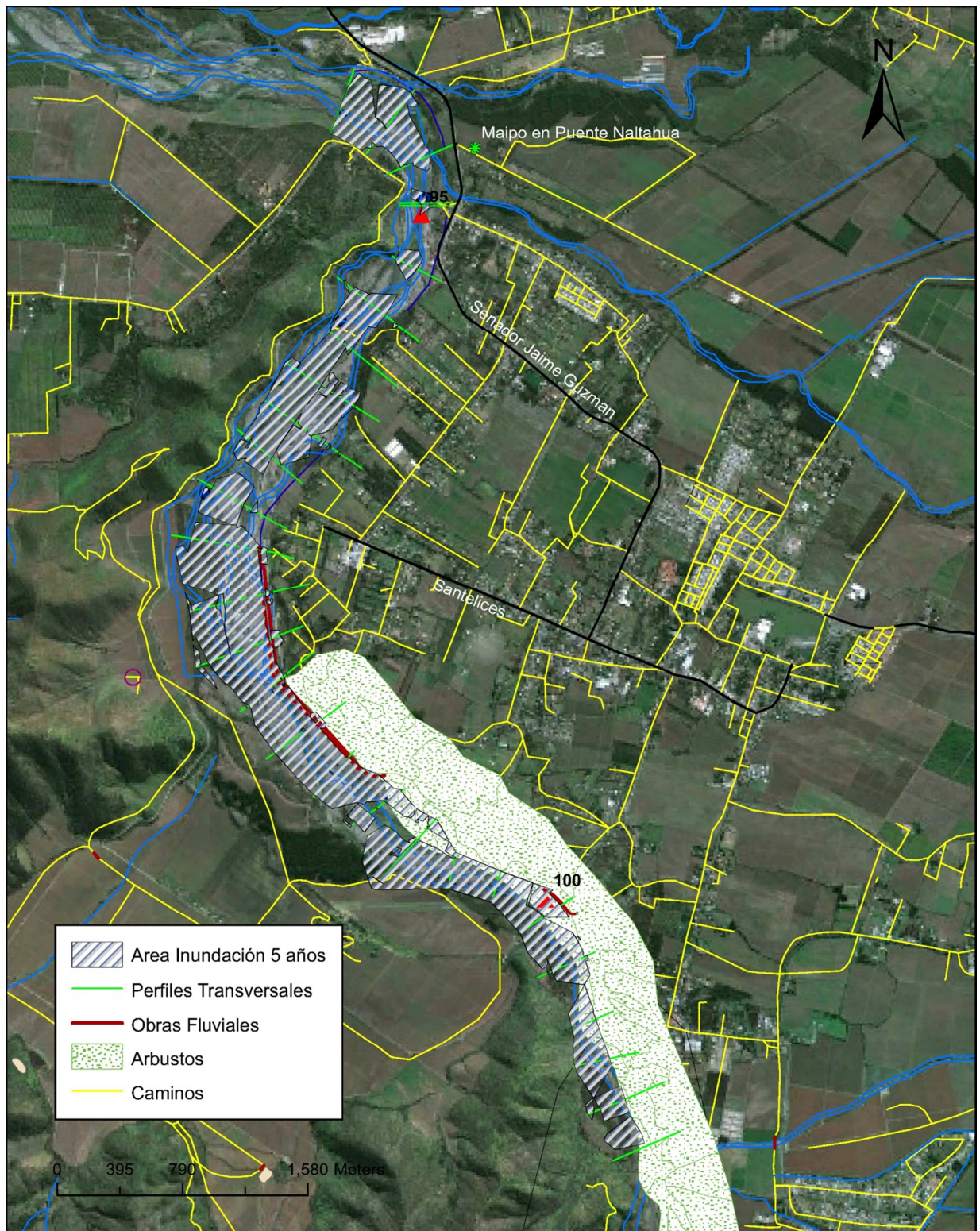


Figura 9-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 200 años, régimen nival, escenario futuro.

## CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

---

Luego del trabajo realizado en esta memoria y con los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. Tal como lo han mostrado trabajos previos y el pronóstico realizado por el IPCC, en estos resultados obtenidos, particularmente para el caudal medio diario modelado en la cuenca de Maipo en San Alfonso, muestran una baja significativa en el período de estudio (2040-2070) para el escenario A1B, el cual supone un equilibrio económico-social. Este déficit de caudal es de un 20 % en el período pluvial, debido principalmente a que existe una disminución de un 28% en la precipitación total anual y de un 32 % de déficit en caudal en el período nival, influido también por la disminución en la acumulación de nieve en la alta cordillera, dado que la temperatura presenta un incremento de 1,8°C. Por otra parte, a pesar de la disminución en el promedio anual de las precipitaciones, existe un aumento en los eventos de crecidas de períodos de retorno altos, o con baja probabilidad de excedencia. Esto se puede ver en el análisis de frecuencia realizado en el capítulo 7, donde existe un incremento de un 20% en el caudal medio diario máximo anual con período de retorno 200 años. Sin embargo, para períodos de retorno bajo, los caudales se ven disminuidos en las proyecciones futuras.
2. El régimen nivo-pluvial de la cuenca Maipo en San Alfonso se mantendría estable. Al realizar las curvas de variación estacional por probabilidad de excedencia se presencia un leve adelantamiento en el caudal peak, pasando de diciembre a noviembre, esto producido principalmente por el deshielo de la nieve en la alta cordillera, proceso que se acelera por el aumento en la temperatura.
3. La modelación del embalse el Yeso, presentó una proyección no muy promisoriosa, debido a que el volumen embalsado se ve severamente disminuido, claramente influenciado por la disminución en las precipitaciones y el aumento en las temperaturas, provocando mayor evaporación en la superficie de agua.
4. En la calibración del modelo específicamente, existe una gran cantidad de suposiciones que se deben realizar debido a la gran cantidad de variables que requiere el programa WEAP. Sobre todo en lo que respecta a la humedad y a la fracción de nubosidad. Debido a que se tiene poco y casi nada de registro para ambas variables, y por cierto menos a nivel diario, se debió optar por algunas suposiciones. La más importante de ellas, fue suponer que si llovía en un día, entonces éste estaba totalmente cubierto de nubes y que su humedad relativa era de un 90%, para el resto de los días se trabajó con los promedios mensuales de dichas variables obtenidas a través del anuario meteorológico para la estación Quinta Normal, en la década de los 80. Otro riesgo que se toma es suponer que los gradientes confeccionados, tanto de temperatura como de precipitación, son válidos para cualquier altitud y además para el escenario futuro. Se asume que la cuenca mantendrá sus propiedades morfológicas y orográficas, es decir, la temperatura seguirá disminuyendo con la altitud y la precipitación aumentando.
5. Un problema importante en esta modelación fueron los caudales altos. Como se comentó en el capítulo 6, el modelo resultó ser muy efectivo para caudales bajo los 100 m<sup>3</sup>/s, es decir, para caudales con 30% o más de probabilidad de excedencia. Sin embargo, debido a

que el objetivo fundamental de este estudio era determinar los caudales con probabilidades menores se tuvo que realizar algunas correcciones, a través de correlaciones entre los caudales simulados y observados, con el fin de mantener la proporcionalidad entre ellos, ya que de esta manera fue posible generar caudales representativos.

Cabe mencionar que el proceso de modelación hidrológica es relativamente simple de llevar a cabo. Sin embargo, las grandes limitantes son la poca cantidad de datos que existe en las cuencas chilenas, sobre todo en las ubicadas en la cordillera. Esto genera una gran incertidumbre, optándose por la suposición de muchos factores, que afectan de mayor manera cuando se trata de una modelación a nivel diario, ya que existe una mayor variabilidad en todos los parámetros.

De la elaboración de los mapas de inundación se puede concluir lo siguiente:

1. El programa HEC-RAS ha sido utilizado en muchos estudios para la elaboración de este tipo de mapas, donde la complementación con el software ArcGis los hacen una herramienta muy poderosa para la modelación hidráulica de cauces.
2. Para realizar esta modelación, se necesita una gran cantidad de datos, partiendo por la topografía del terreno, donde los perfiles transversales son fundamentales. Esta es una de las razones principales de por qué se escogió esta cuenca para el estudio. Además se requiere información acerca del coeficiente de Manning del lecho. Estos datos y recopilación de antecedentes fue extraída del estudio Plan Director del Río Maipo, el cual fue la base para la generación de los mapas.
3. La información cartográfica digital recopilada de dicho estudio también forma parte importante en la elaboración de los mapas, ya que representan el terreno propiamente tal, y entrega información adicional de las obras que existen en el área.
4. Al importar los resultados de superficie de agua desde HEC-RAS a ArgGis, se debe utilizar un archivo del terreno, con el cual el programa puede crear el polígono o área de inundación, a través de una diferencia en las cotas de terreno y de agua. Como es de esperarse, este archivo de terreno debe ser lo suficientemente detallado para que admita las diferencias que existen entre el terreno y la superficie de agua, los cuales no deben superar más allá de 10 metros. Se intentó crear este archivo utilizando las curvas de nivel proporcionadas por el IGM, pero estas curvas están cada 50 metros, no siendo útiles para el nivel de detalle deseado. Asimismo, se intentó lo anterior a través de un modelo de elevación digital (DEM), lo cual no entrego resultados adecuados debido a su baja resolución. Finalmente se optó por generar curvas de nivel a partir de los puntos obtenidos en la topografía, pudiéndose finalmente obtener el nivel de detalle deseado. Sin embargo, el problema que existe con este método, es que no se tiene más información que los puntos mencionados, es decir, no existe información acerca de las zonas aledañas a los puntos de terreno.
5. Como se dijo en el capítulo 8, se utilizó la línea base como los caudales entregados por el estudio base de A&C Consultores y se contrastaron con los caudales futuros generados en este informe. La razón por la que se compararon dichos caudales radica en que dicho estudio ya fue presentado al Ministerio de Obras Públicas, generando la información

necesaria y las medidas a tomar para crecidas importantes. Por otra parte, los caudales generados tanto para el régimen nival como pluvial se encuentran dentro del orden con respecto a los caudales de la línea base para el mismo período de retorno, salvo períodos altos (T=200 y T=100 años). Pero si se analizan los caudales de la línea base obtenidos por este estudio y los caudales obtenidos por el estudio de A&C contra los caudales futuros, entonces sí existe un aumento en los caudales de crecidas con períodos de retorno de 200 y 100 años, una de las consecuencias esperables del cambio climático. Es por esto, que es esperable que producto del cambio climático exista un aumento en la probabilidad con la que ocurren estos eventos, alterando quizá el período de retorno con el cual se están diseñando las obras de defensas fluviales en la zona.

6. Actualmente, la zona en estudio presenta una frecuencia de inundación alta, considerando que el río se desborda con crecidas de períodos de retorno menores a 5 años (en régimen pluvial), como se puede apreciar en la Figura 9-3. Esta frecuencia no se vería afectada por el cambio climático, es más, se mantiene para todos los mapas generados donde se puede observar a lo largo de toda la ribera derecha del río el desborde del cauce, donde existen obras fluviales cuya capacidad es inferior a la de crecidas de T=5 años. Sin embargo, como se puede apreciar en los mapas, la zona de inundación se verá disminuida, pero de cualquier forma seguirán existiendo los mismos problemas que aquejan hoy en día al sector.
7. Cabe mencionar que la comuna de Isla de Maipo no cuenta con un plan vigente que norme el uso del cauce, por lo tanto no existe la definición de áreas vulnerables ni un adecuado manejo de uso de suelo.
8. Finalmente, es de esperar que los resultados obtenidos en este informe sirvan para aportar información de manera clara, con el fin de que personas dispongan del conocimiento acerca de esta zona.

## CAPÍTULO 11. BIBLIOGRAFÍA

---

- AC Ingenieros Consultores Ltda. (2008). Diagnóstico Plan Maestro Río Maipo y sus Afluentes, Región Metropolitana- Dirección de Obras Hidráulicas- MOP, Santiago, Chile.
- Alkema, D. 2003 Flood Risk assessment for EIA; an example of motorway near Trento, Italy. Studi Trentini di Scienze Naturali- Acta Geologica v.78 (2001), pp 147-153, Trento 2003.
- BBC Weather Centre. “Flooding”, [en línea]. Julio 2005.
- CADE-IDEPE Ingenieros Consultores (2004). Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Maipo, Chile.
- Departamento de Administración de Recursos Hídricos, 2003. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo, Chile.
- DGF. [s.a]. Impactos Sociales Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bío Bío.
- Dirección General de Aeronáutica Civil, Dirección Meteorológica de Chile, Subdirección Climatológica y Meteorología Aplicada. 1980 Anuario Meteorológico.
- Emergency management Institute, U.S Homeland Security, Chapter 4, Flood Risk Assessment.
- Environment, Heritage and Local Government. 2009 The Planning System and Flood Risk Management, The office of Public Water.
- IPCC (2007). “Summary for Policymakers”. En: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribución del Working Group I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K..B. Averyt, M Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Lane, A.; Prandle, D... 2007 Changing flood risks in estuaries due to global climate change: forecasts from observations, theory and models. *International Journal of Applied Mathematics and Engineering Sciences*, 1 (1). 69-88.
- Mirza, M. Monirul Qader. 2002 Global Warming and changes in the probability of occurrence of flood in Bangladesh and implications. *Global Environmental Change* 12 (2002) 127-138. Pergamon
- Monev, Evelin. Some Principals Problems in Flood Risk Assessment. Institute of Water Problems, Bulgarian Academy of Science.
- National Wildlife Federation. 2008. Heavy Rainfall and Increased Flooding risk: Global warming’s Wake-up Call for the Central United States.
- Plate, Erich J. 2002. Flood Risk and Flood Management. *Journal of Hidrology* 267 (2002) 2-11, Elsevier.
- The Mekong River Comission Secretariat. 2009 Best Practise Guidelines for Flood Risk Assessment.
- Young C. et al., 2009. “Modeling the Hydrology of California’s Sierra Nevada for Sub-Watershed scale Adaptation to Climate Change” Computation Methods in Water Resources XVII International Conference.
- Zerger, A. Wealands, S. 2004 Beyond Modelling: Linking Models with GIS for Flood Risk Management. *Natural Hazards* 33: 191-2008, 2004, Kluwer Academic Publishers. Printed in te Netherlands



## ANEXO A: MAPAS DE INUNDACIÓN LÍNEA BASE

A continuación se presentan los mapas correspondientes a los períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años, tanto para régimen nival como pluvial, en línea base.

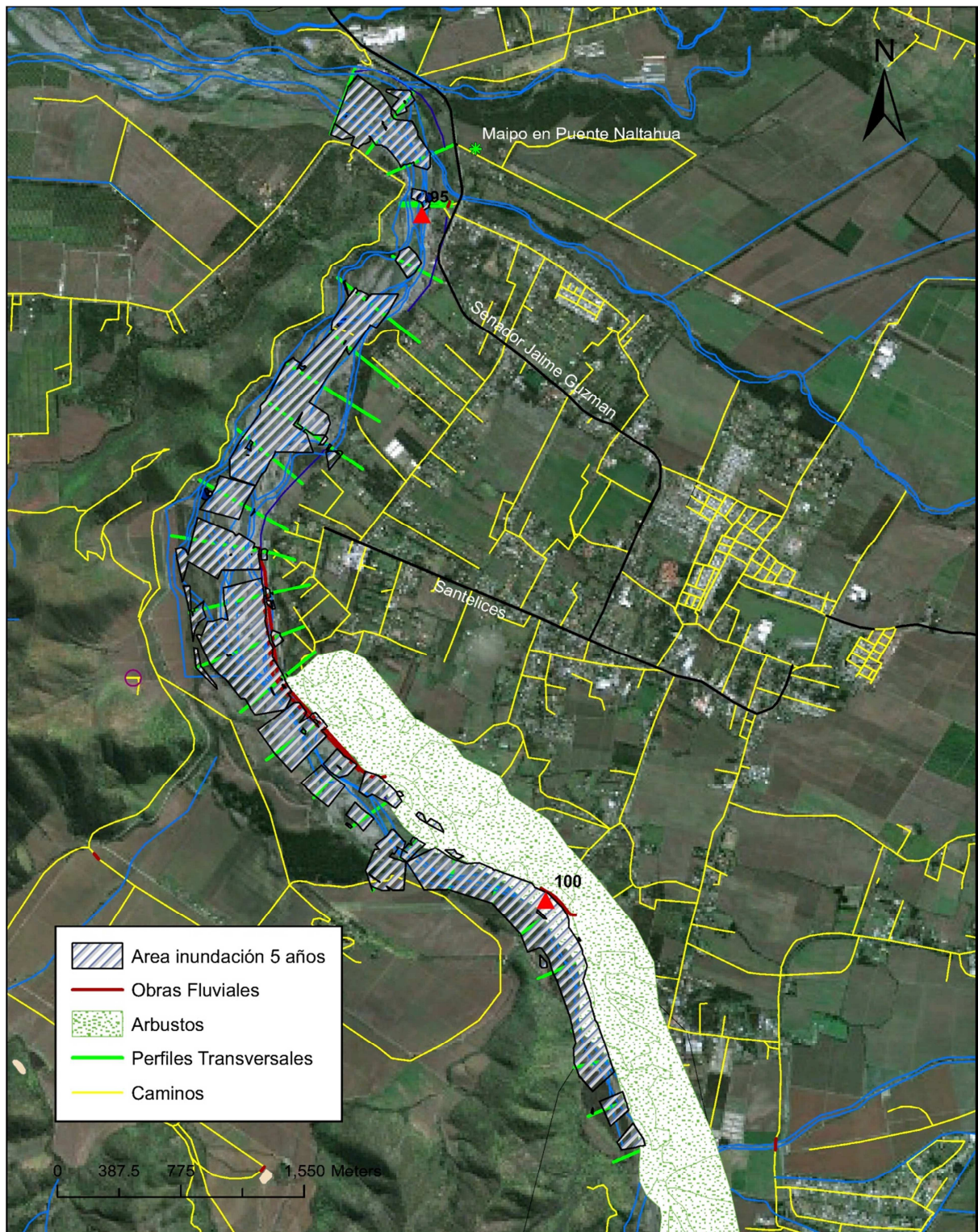


Figura A-1. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen pluvial, escenario línea base.



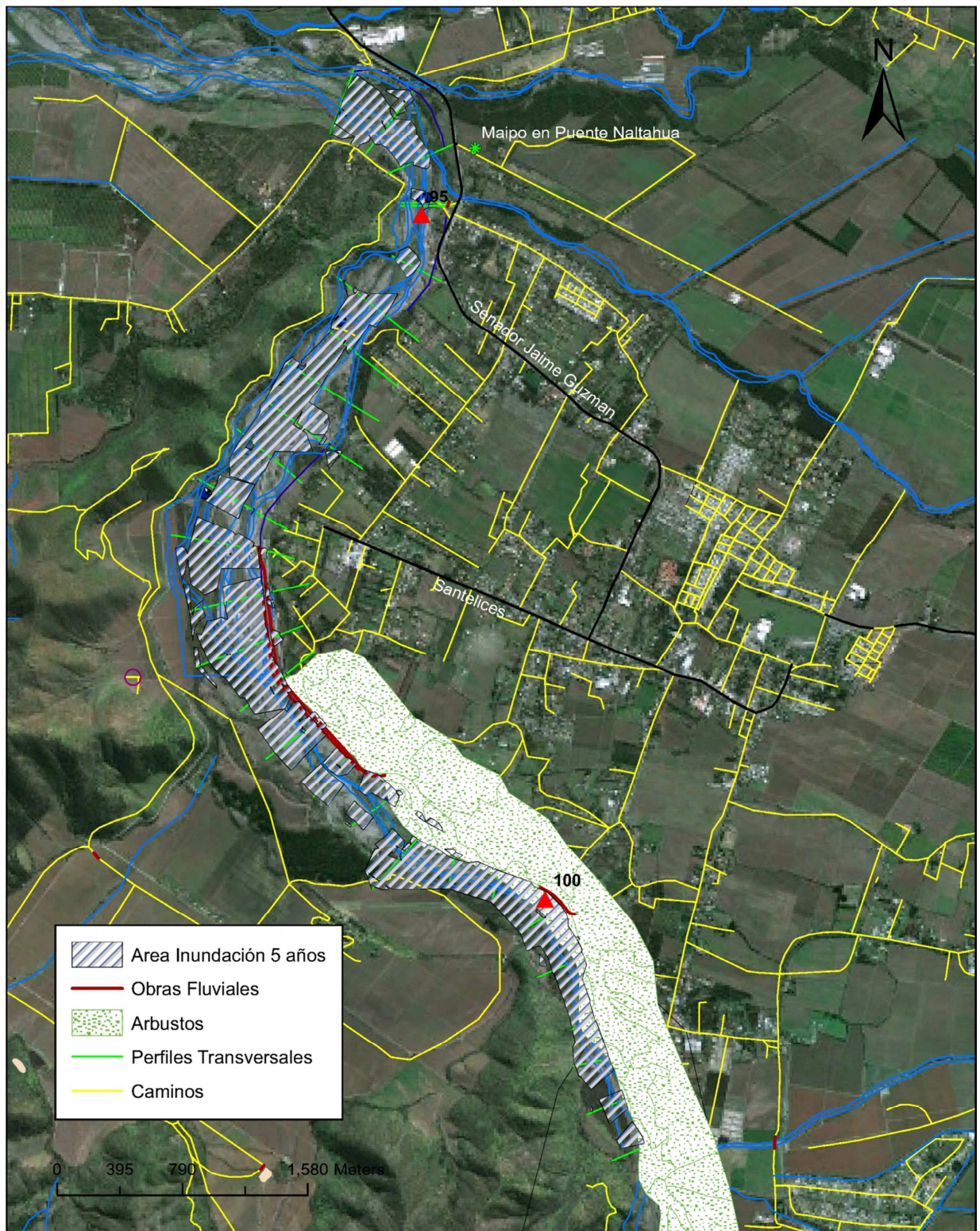


Figura A-2. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen nival, escenario línea base.



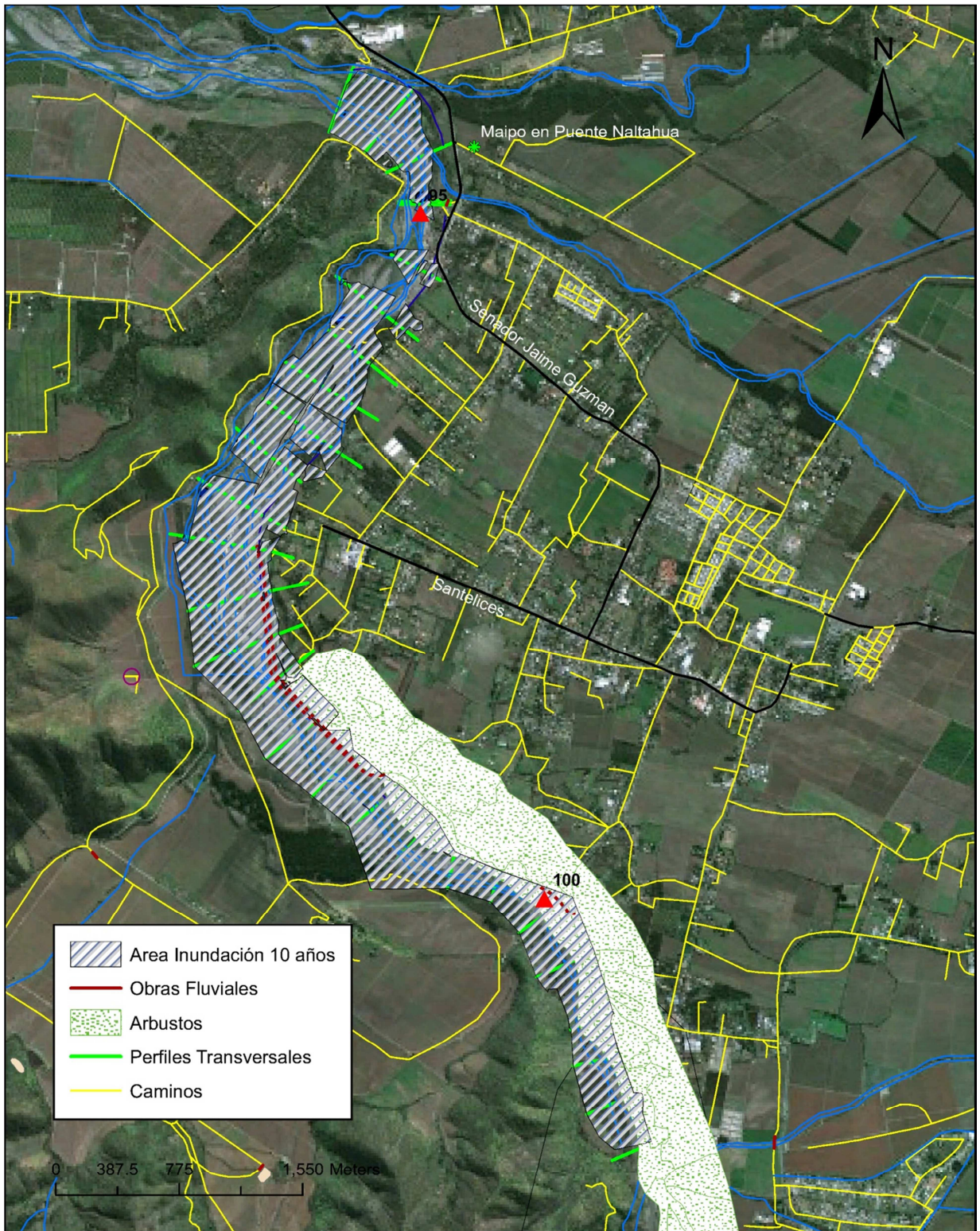


Figura A-3. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen pluvial, escenario línea base.



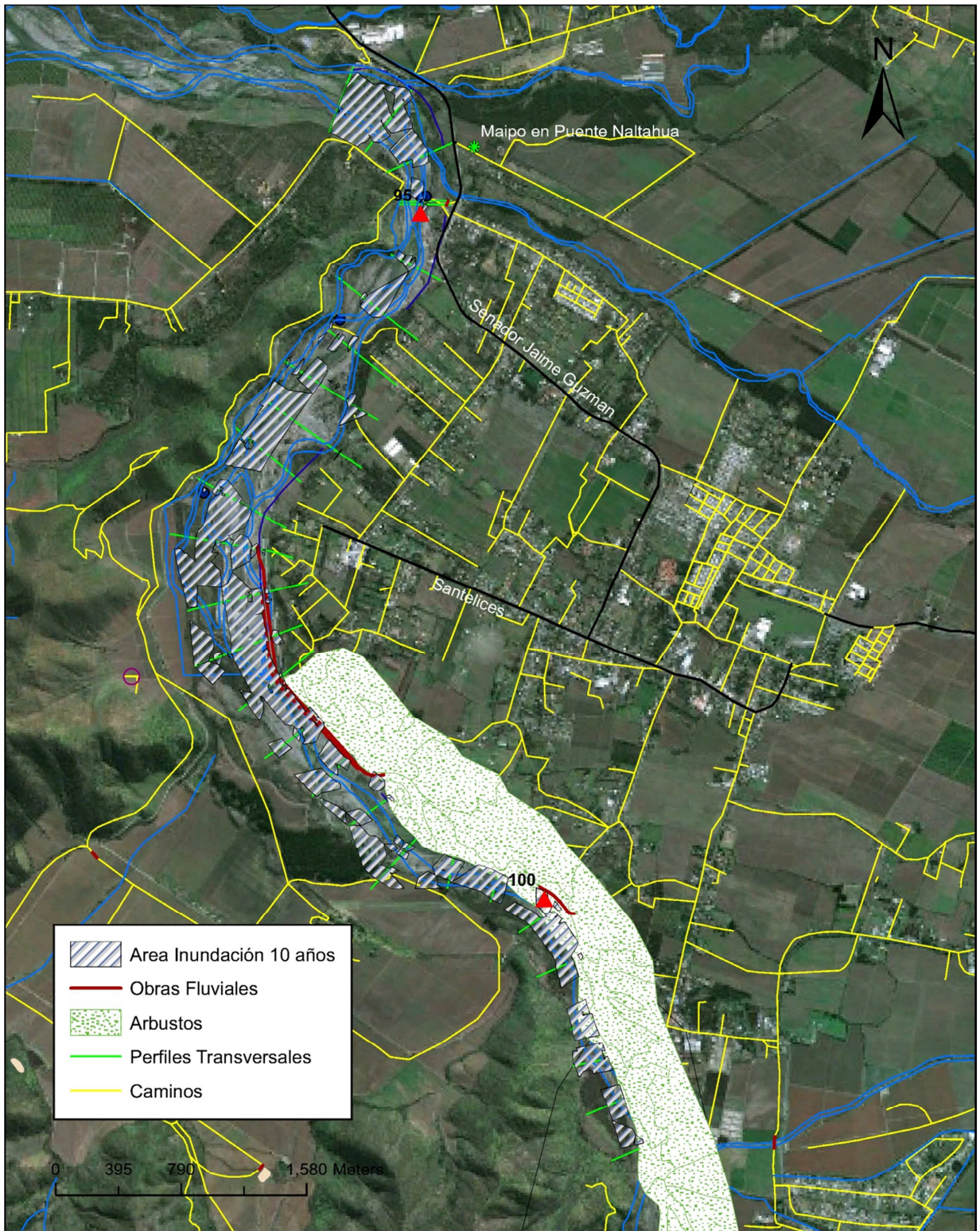


Figura A-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen nival, escenario línea base.



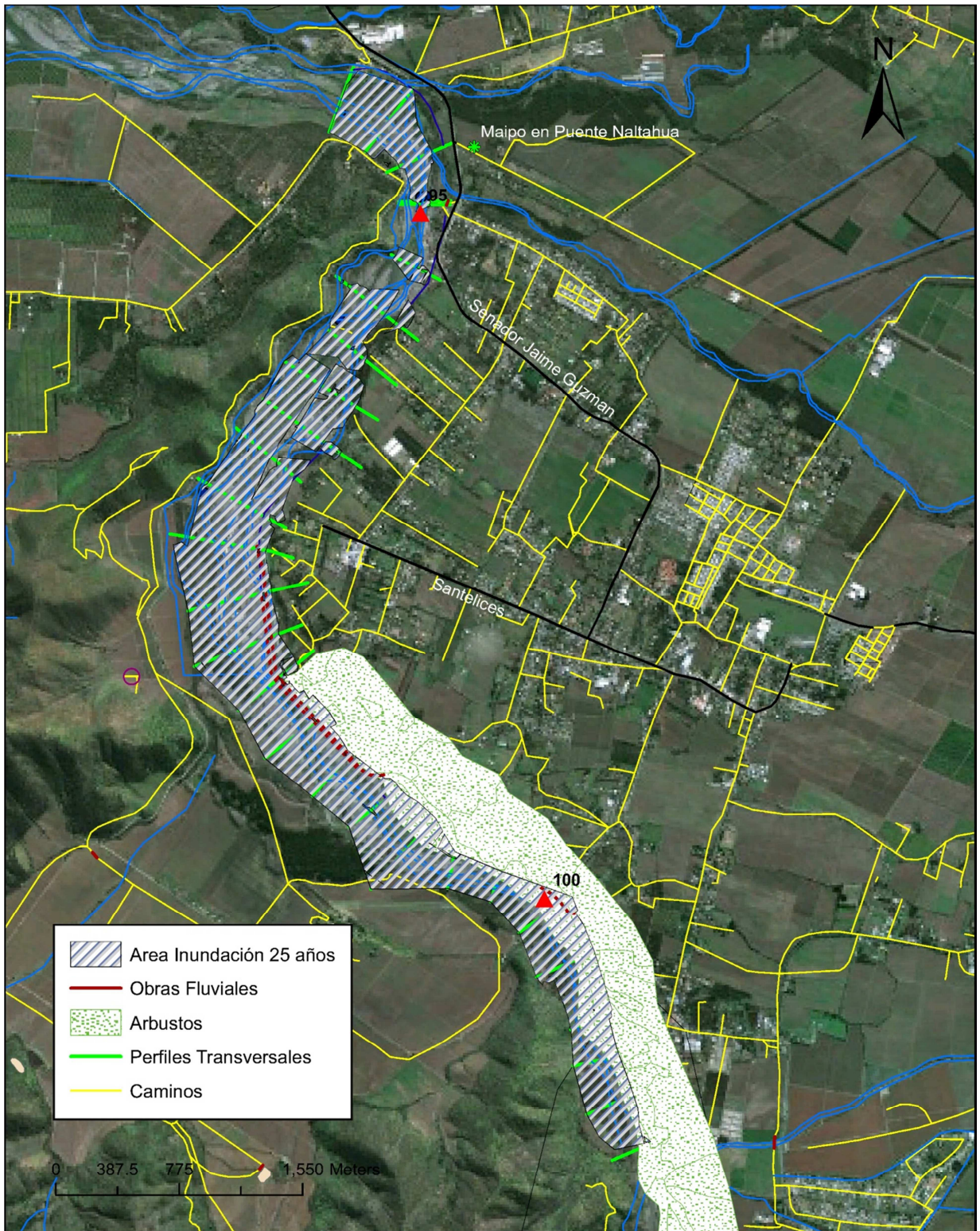


Figura A-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen pluvial, escenario línea base.



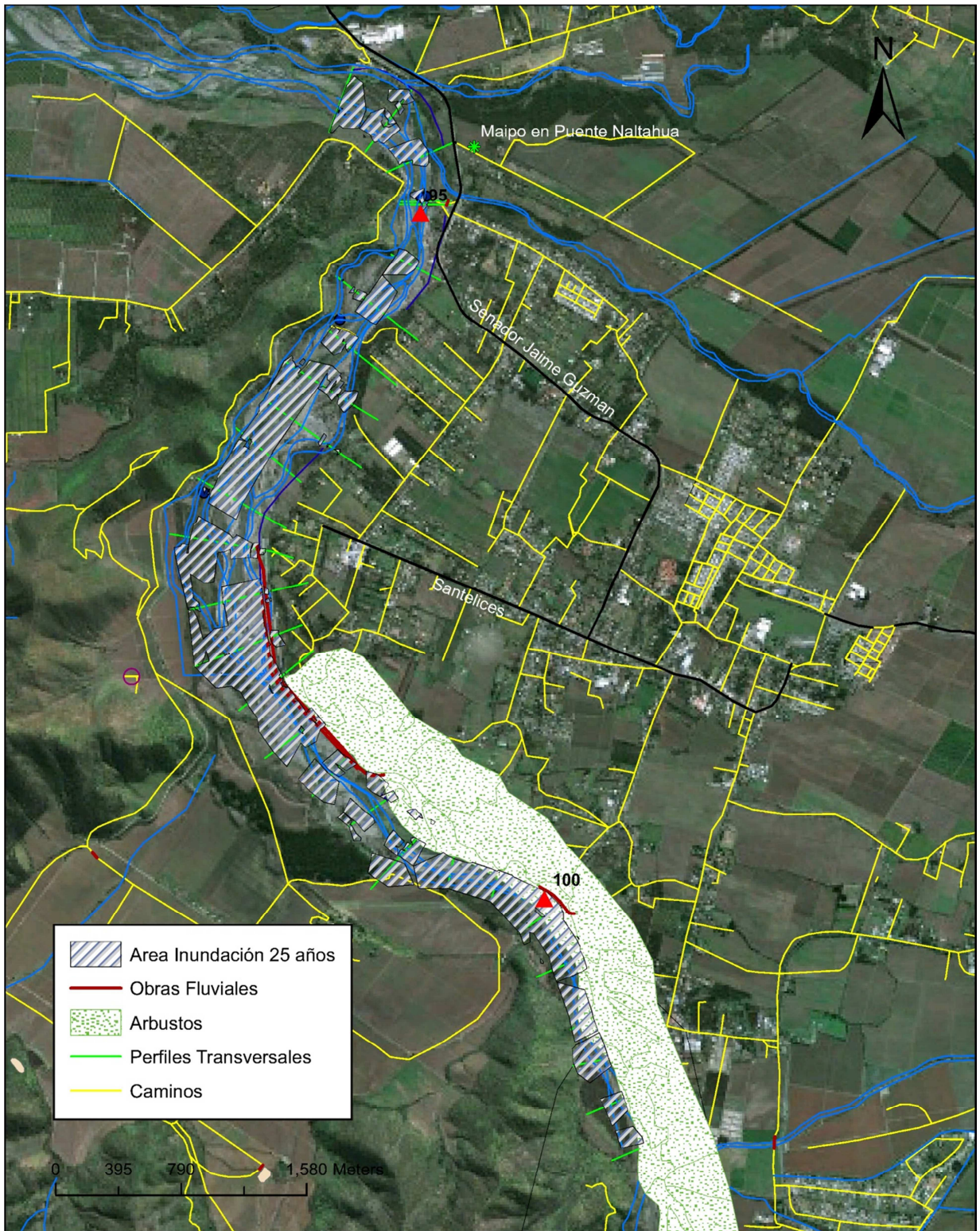


Figura A-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen nival, escenario línea base.



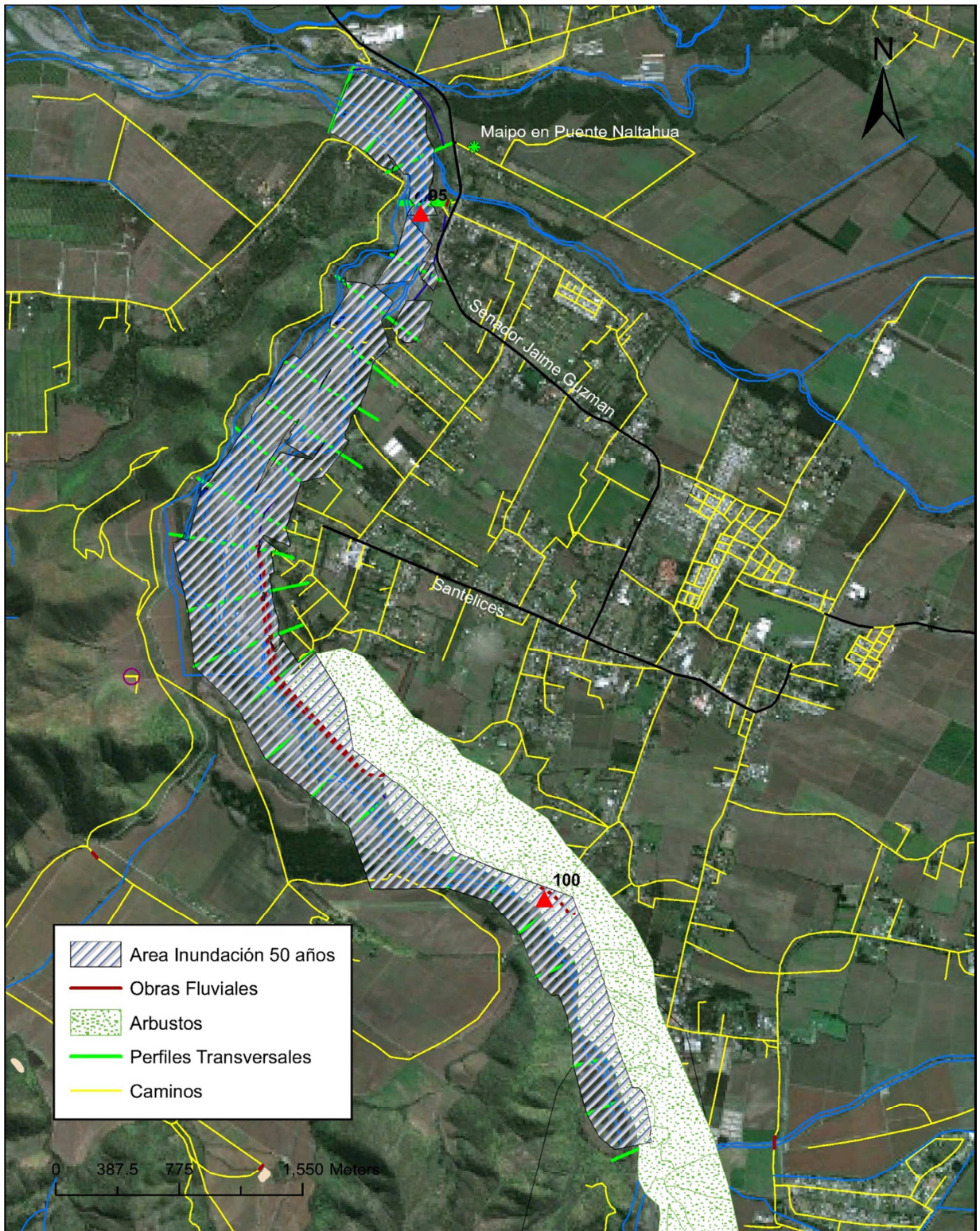


Figura A-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen pluvial, escenario línea base.



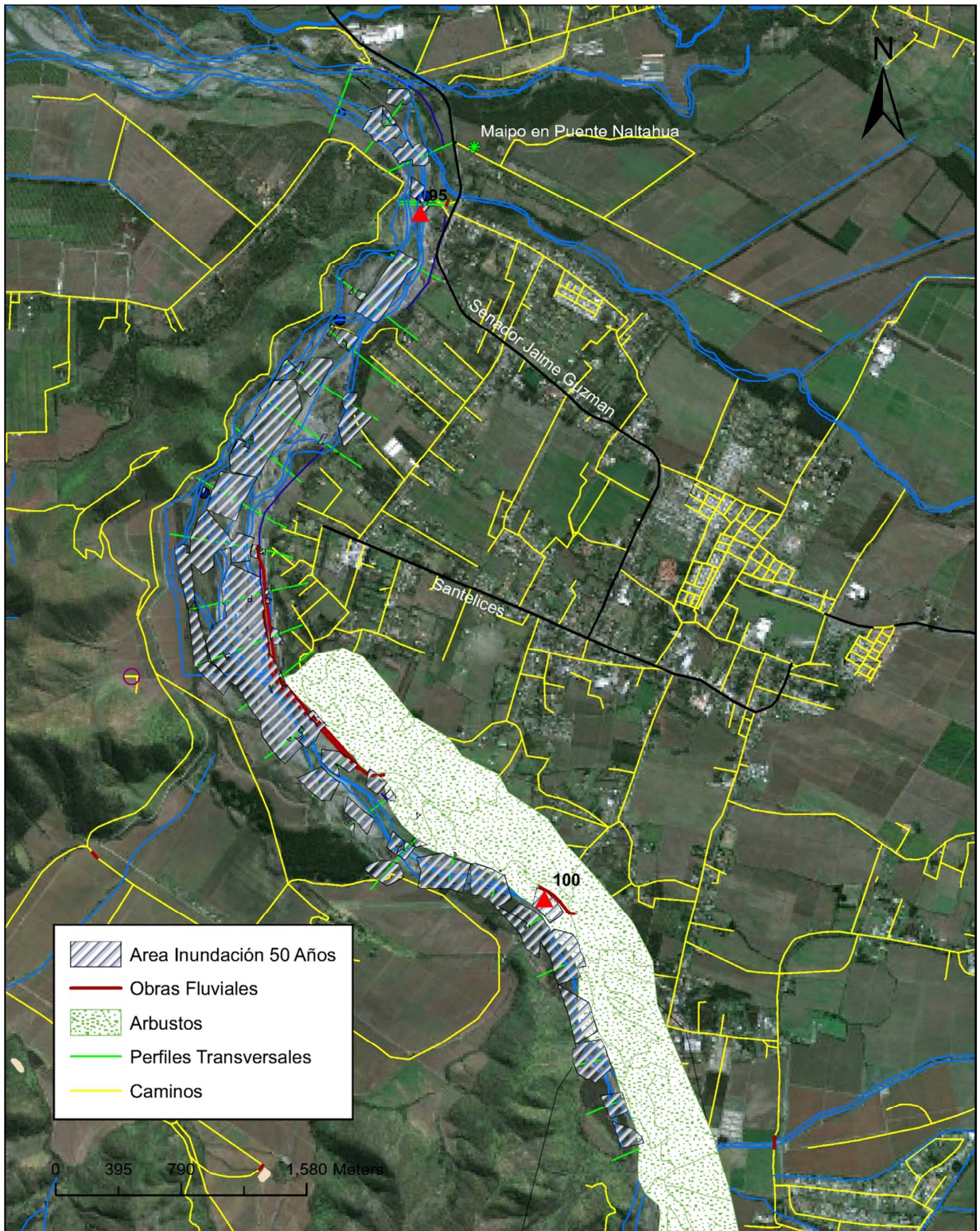


Figura A-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen nival, escenario línea base.



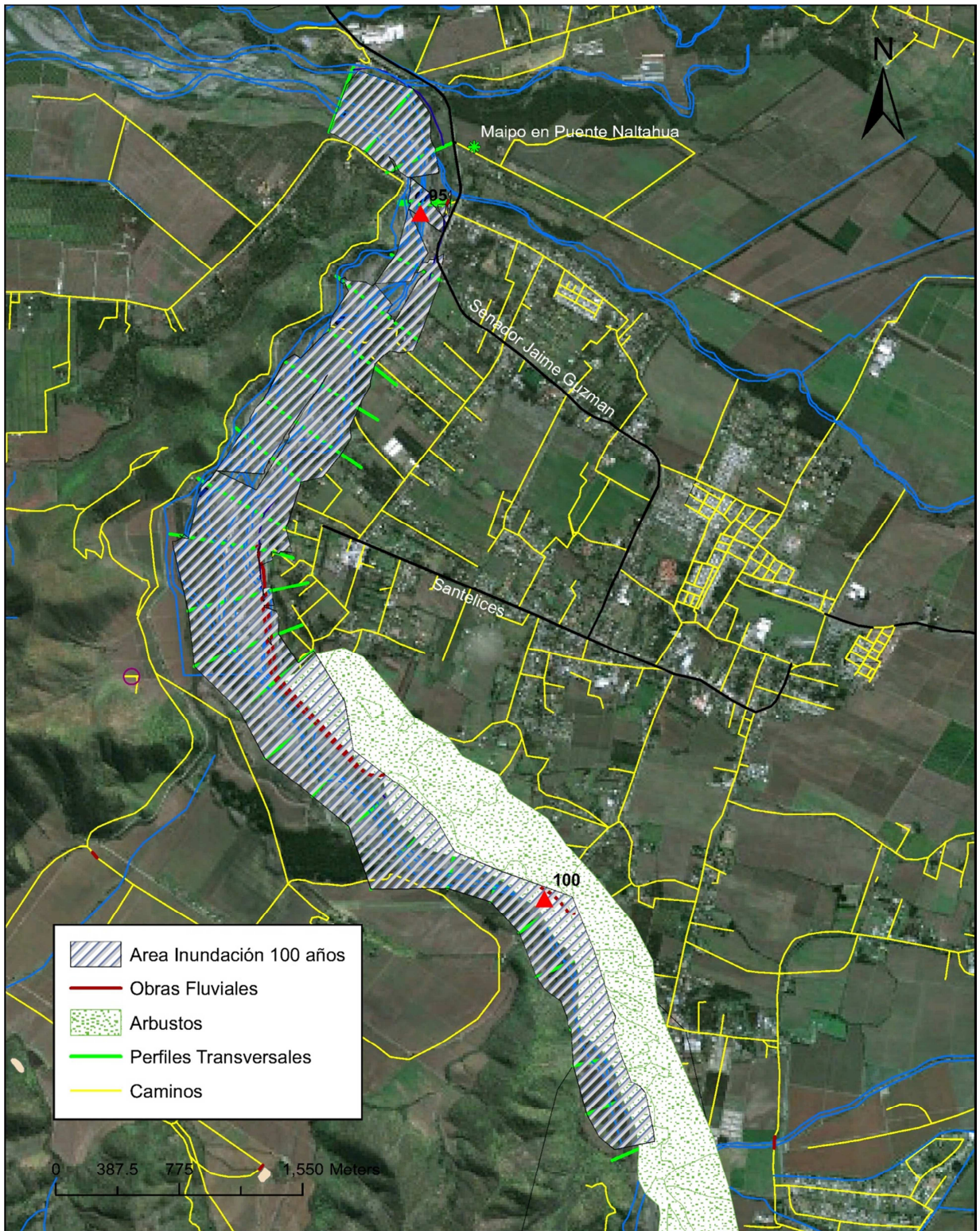


Figura A-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen pluvial, escenario línea base.



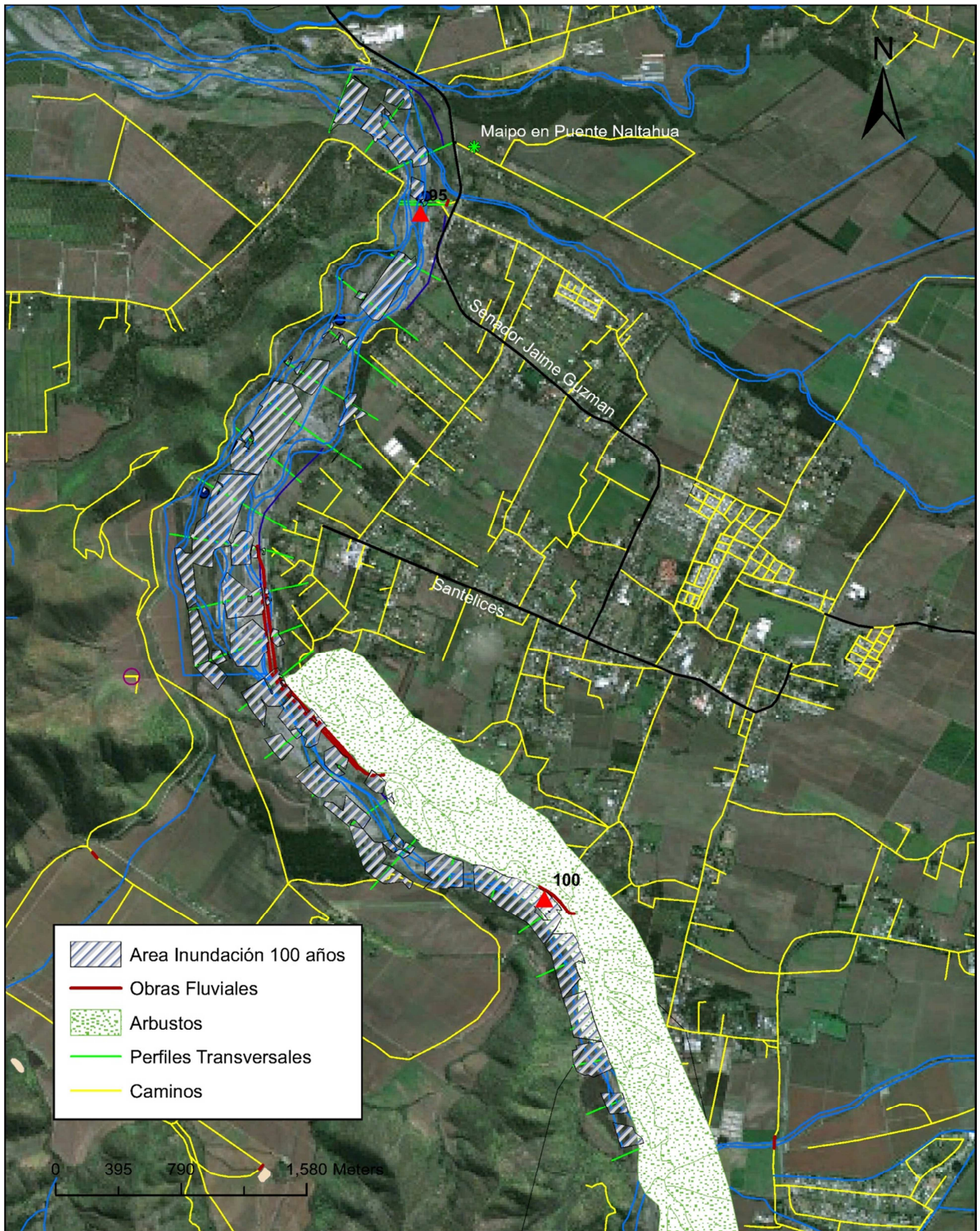


Figura A-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen nival, escenario línea base.



## ANEXO B: MAPAS DE INUNDACIÓN ESCENARIO FUTURO

A continuación se presentan los mapas correspondientes a los períodos de retorno 5, 10, 25, 50 y 100 años, tanto para régimen nival como pluvial, para el escenario futuro (2040-2070)

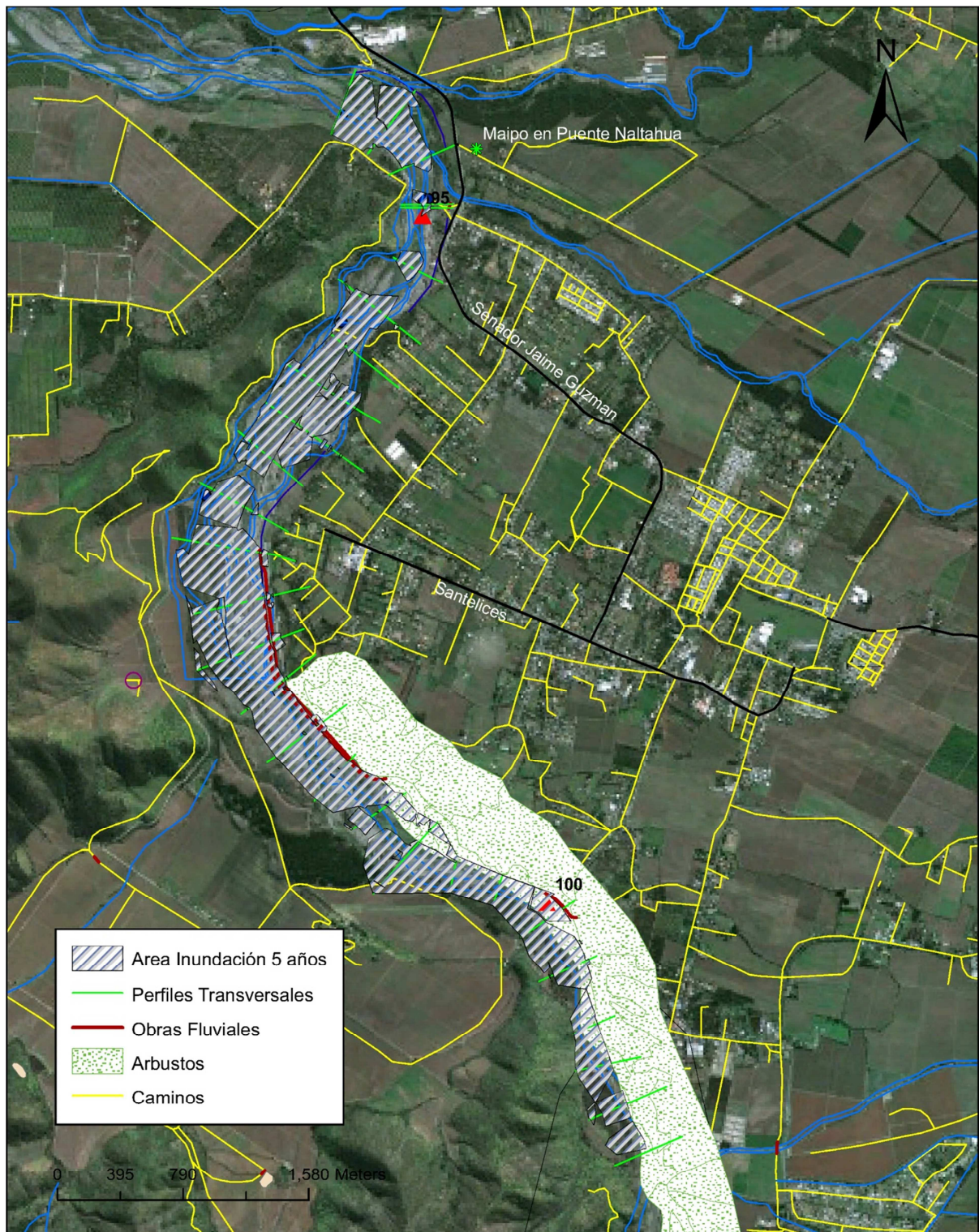


Figura B-1. Mapa Área Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen pluvial, escenario futuro.



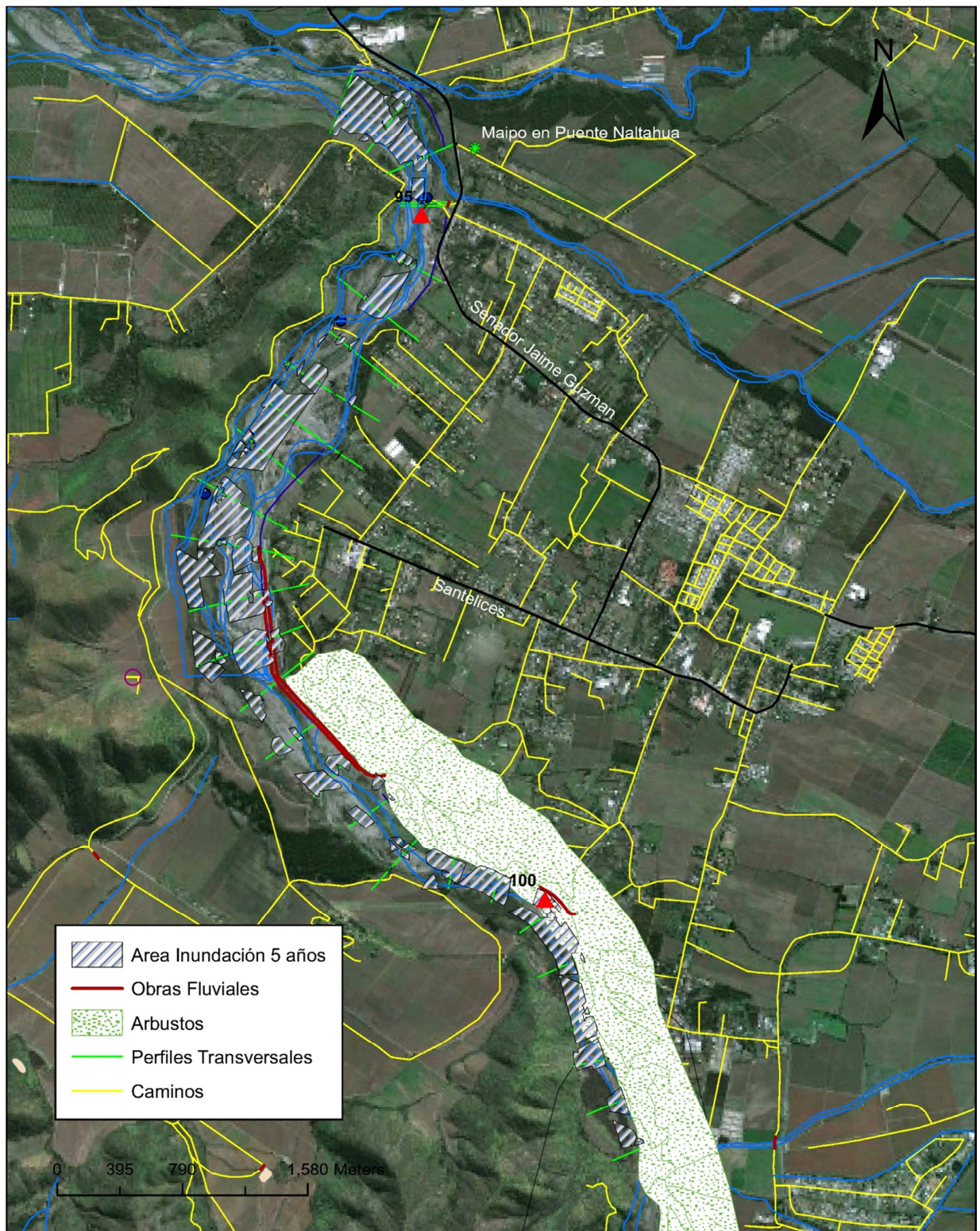


Figura B-2. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 5 años, régimen nival, escenario futuro.



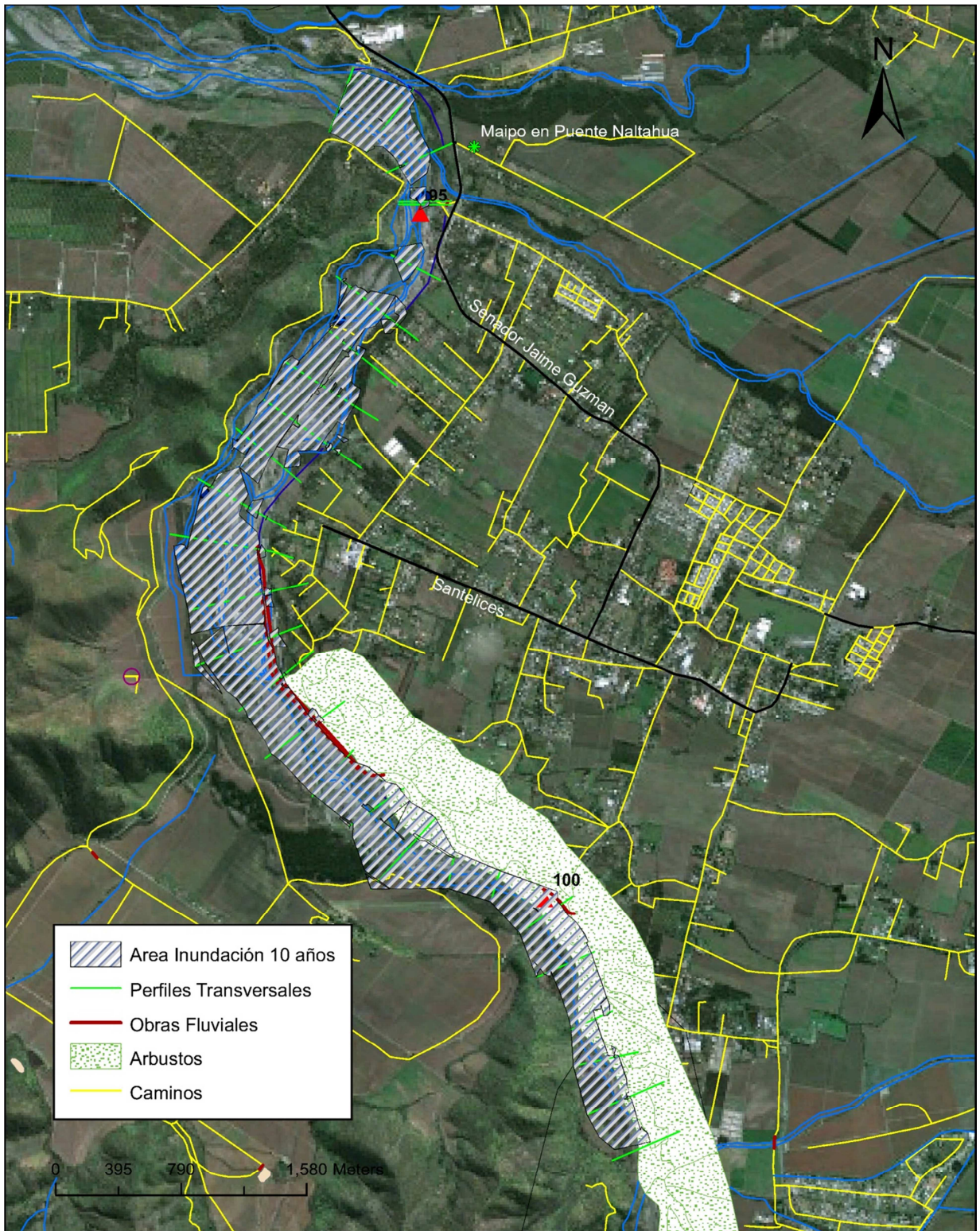


Figura B-3. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen pluvial, escenario futuro.



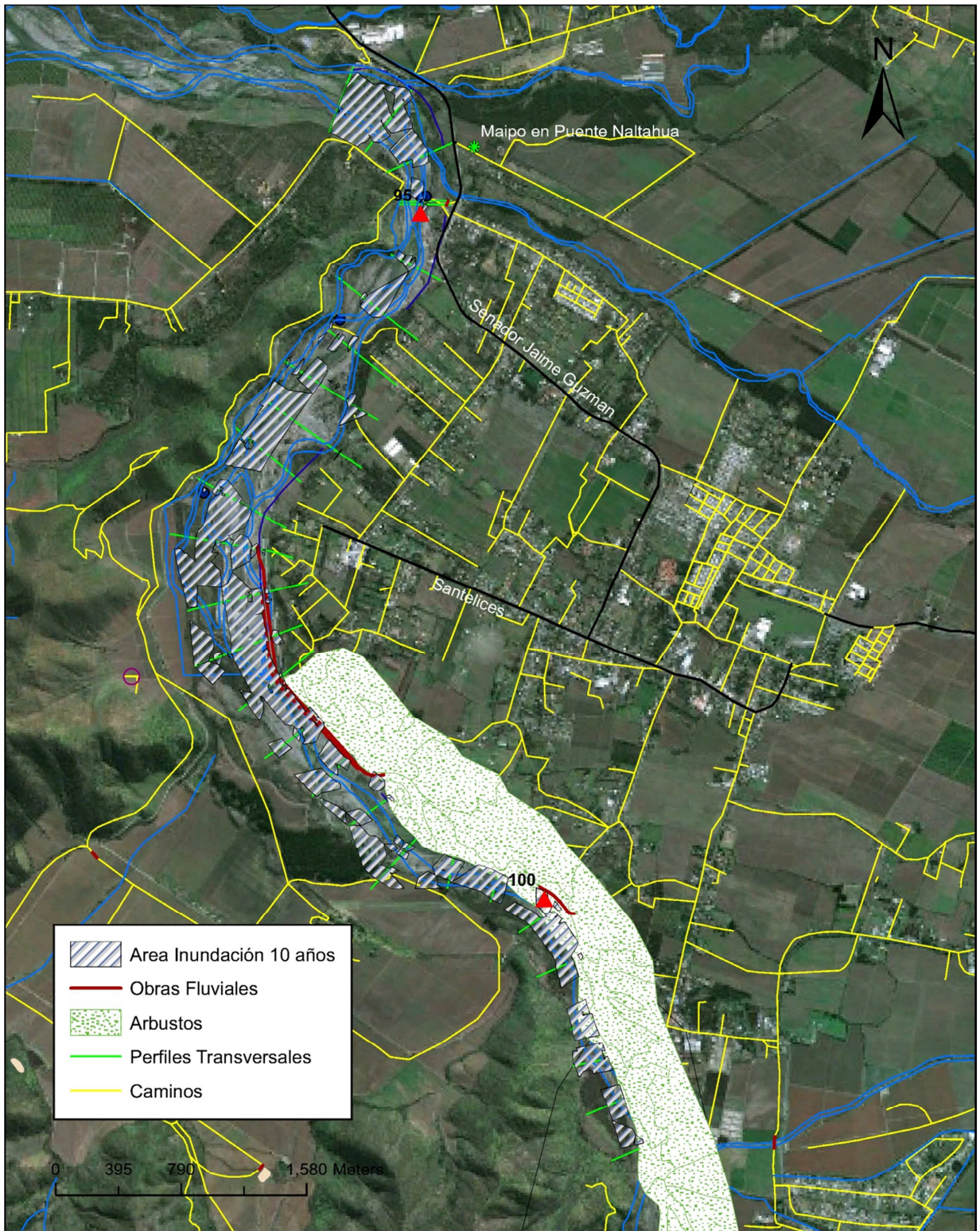


Figura B-4. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 10 años, régimen nival, escenario futuro.



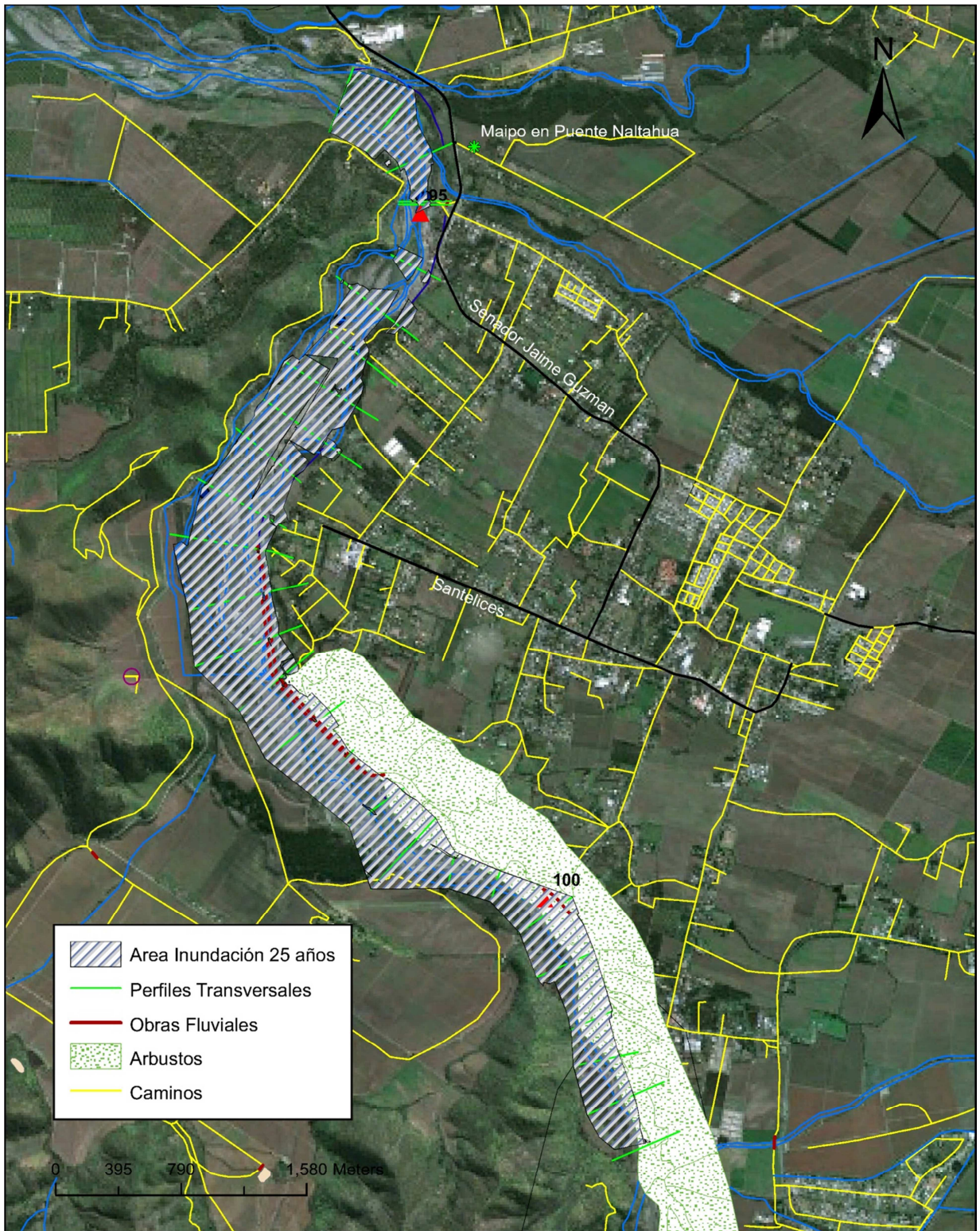


Figura B-5. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen pluvial, escenario futuro.



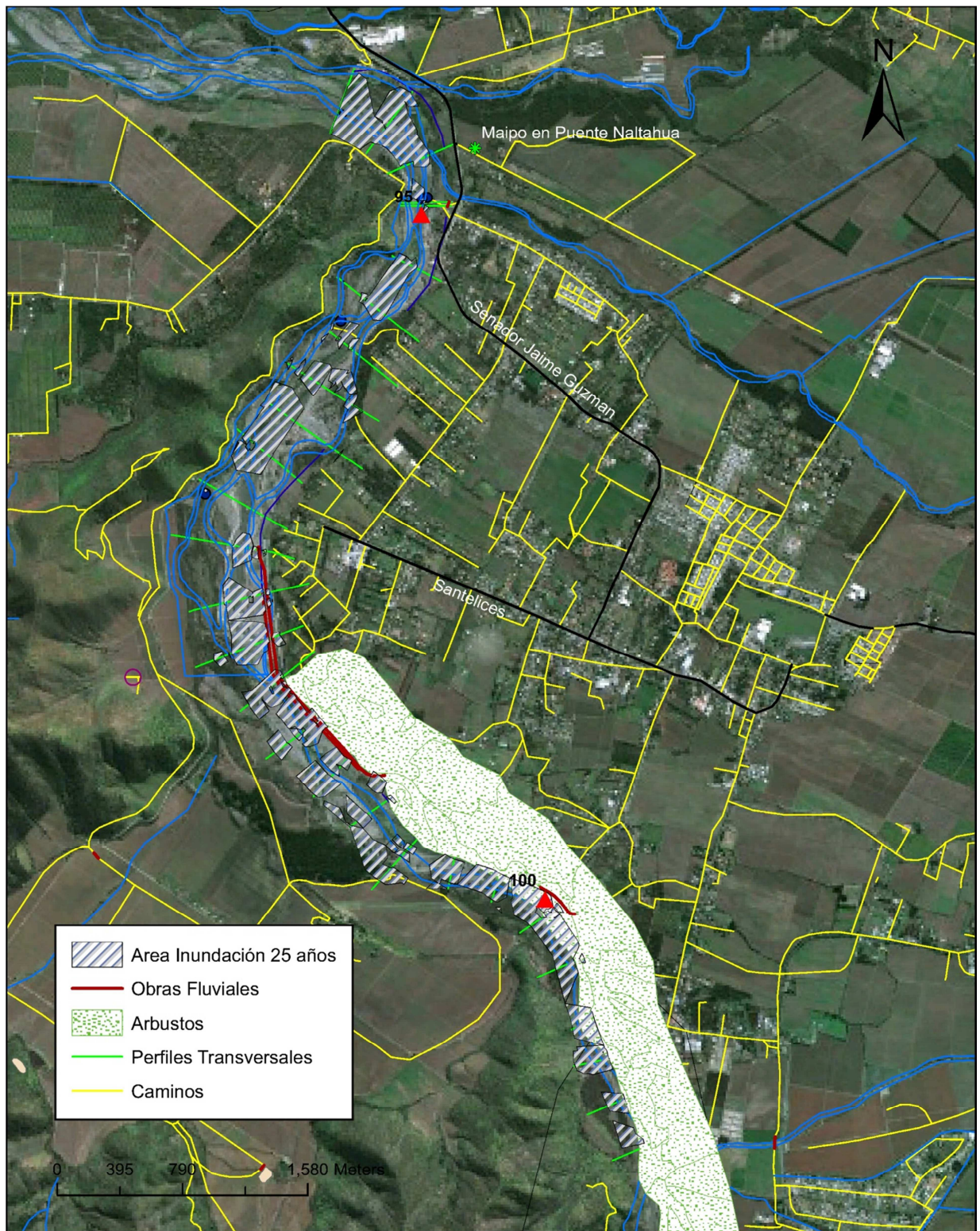


Figura B-6. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 25 años, régimen nival, escenario futuro.



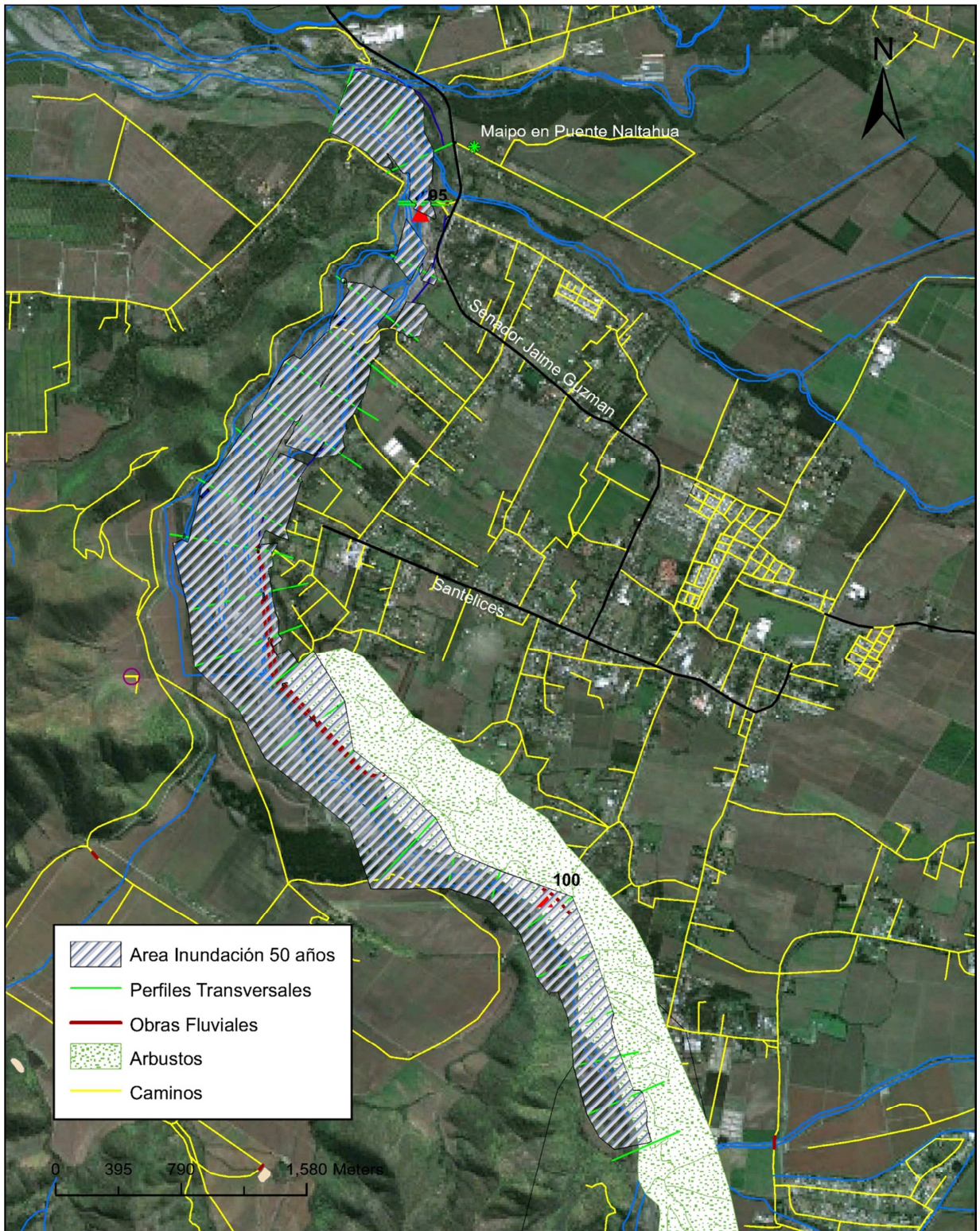


Figura B-7. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen pluvial, escenario futuro.



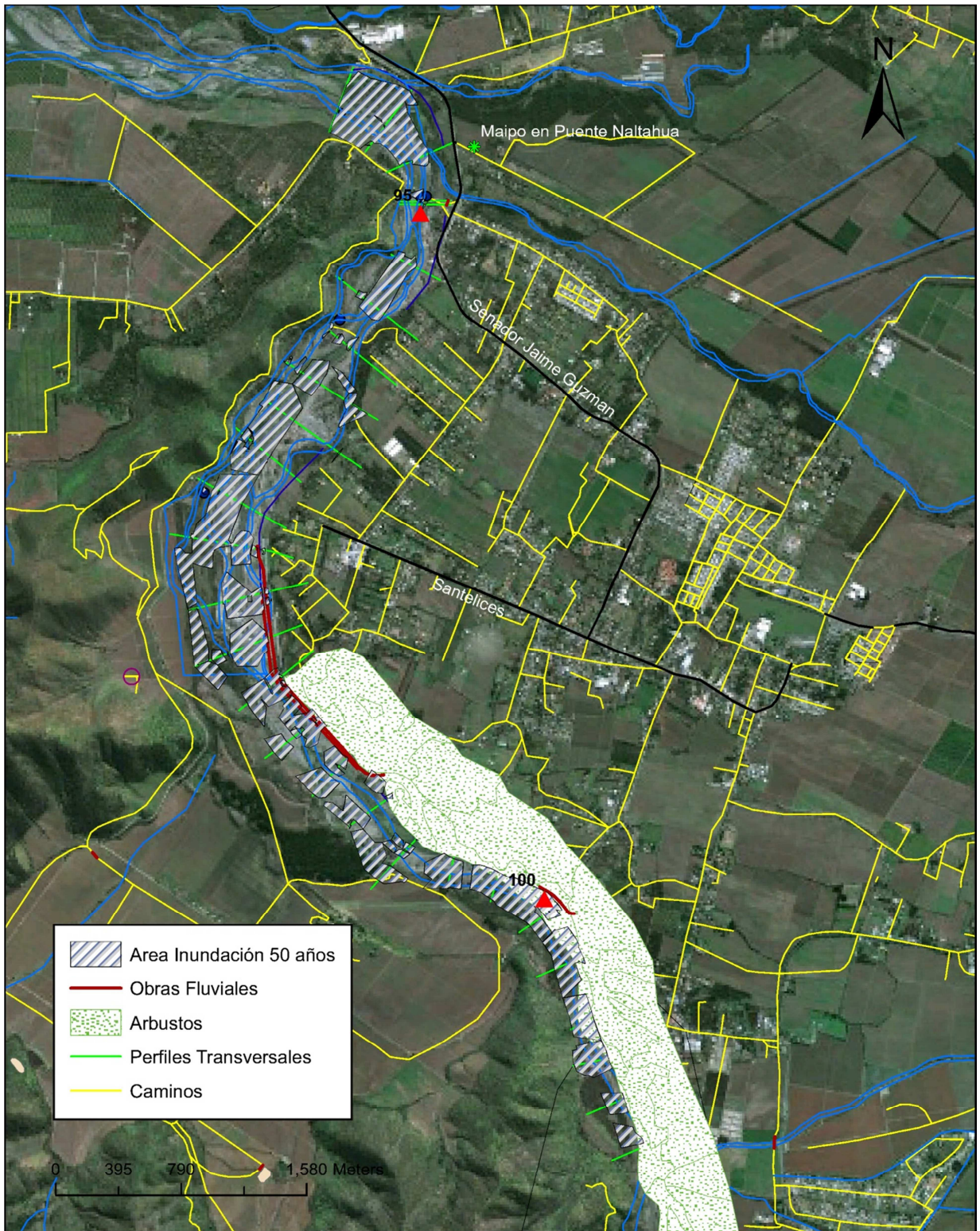


Figura B-8. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 50 años, régimen nival, escenario futuro.



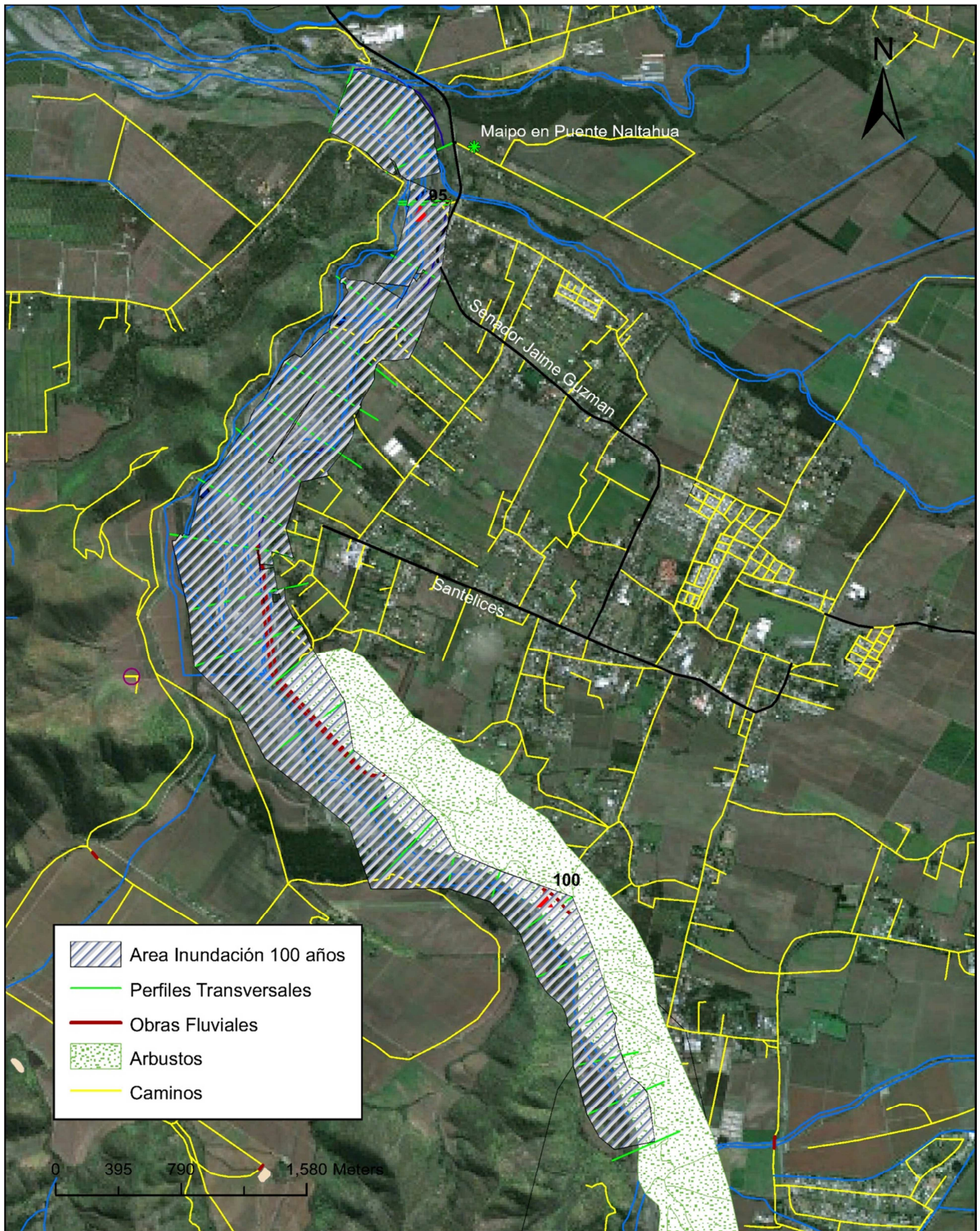


Figura B-9. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen pluvial, escenario futuro.



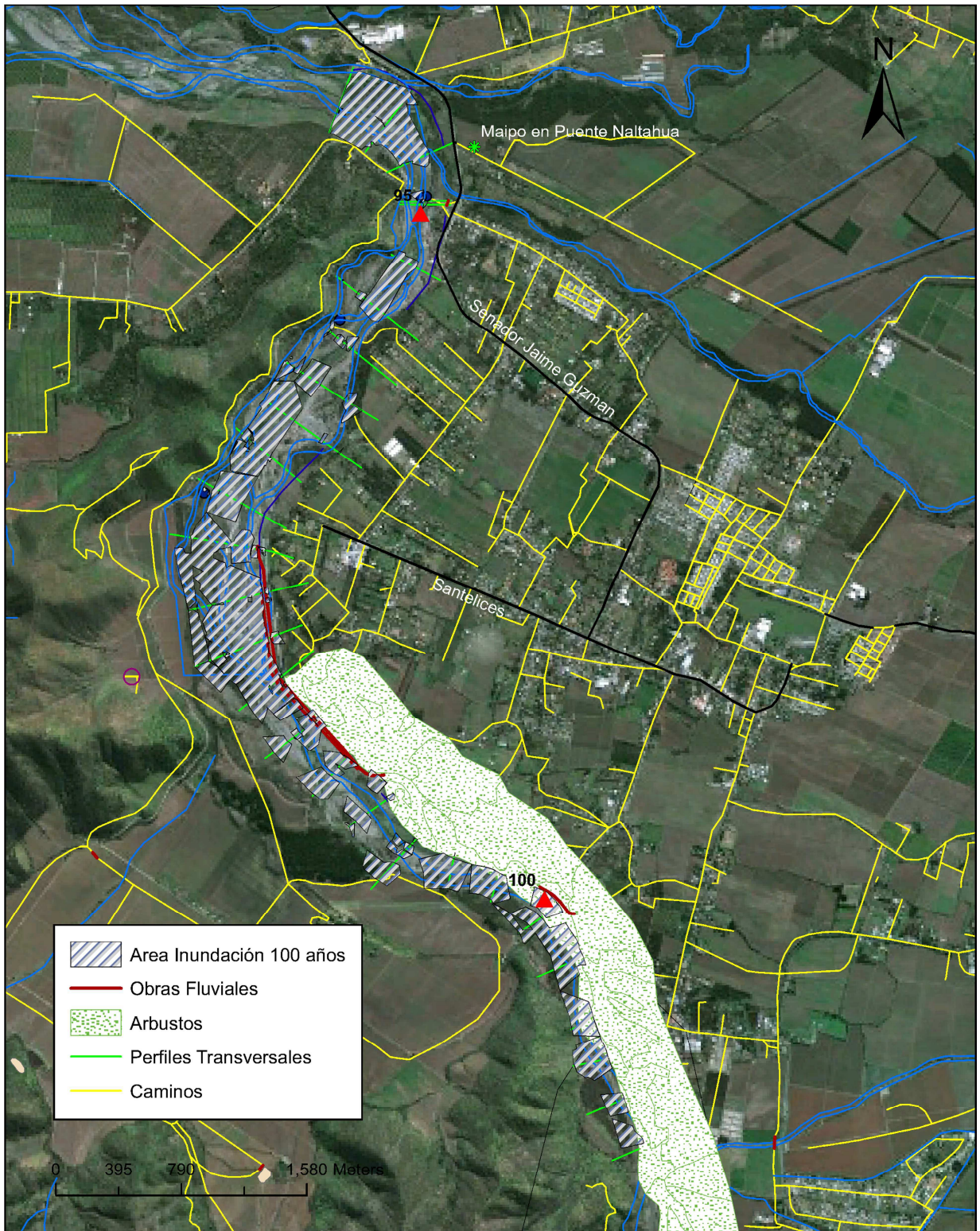


Figura B-10. Mapa Área de Inundación asociado a período de retorno de 100 años, régimen nival, escenario futuro.