



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DPTO. DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

LEVANTAMIENTO DE PARÁMETROS PARA LA MODELACIÓN DE CUENCAS PLUVIALES NO CONTROLADAS EN LA VII Y VIII REGIÓN

REALIZADO POR:

RODHOS Asesorías y Proyectos Ltda.

S.I.T. N° 155

SANTIAGO, NOVIEMBRE DE 2008

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Sergio Bitar H.

Director General de Aguas
Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Jefe Departamento de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Sr. Miguel Ángel Caro H.

RODHOS ASESORÍAS Y PROYECTOS LTDA.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil MBA Sra. Damaris Orphanópoulos S.

Profesionales Participantes
Ing. Civil Sra. Verónica Araya P.
Ing. Civil Hidráulico Sr. Pascal Dumoulin W.
Técnico en Topografía Sr. Betel Leclerc G.

LEVANTAMIENTO DE PARÁMETROS
PARA LA MODELACIÓN DE CUENCAS PLUVIALES NO CONTROLADAS
EN LA VII Y VIII REGIÓN

INFORME FINAL

INDICE

		Pág.
CAP 1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
CAP 2	RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES	10
	2.1 Antecedentes recopilados	10
	2.2 Revisión de antecedentes sobre modelación	12
	2.3 Revisión de antecedentes sobre suelos	32
	2.4 Revisión de antecedentes sobre evaporación horaria	37
	2.5 Antecedentes en SIG	42
CAP 3	IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS Y PERÍODOS DE CALIBRACIÓN	45
	3.1 Primer descarte de estaciones nivales o alteradas	45
	3.2 Segundo descarte de estaciones nivales, pluvionivales o alteradas	53
	3.3 Tercer descarte: Visita de terreno	55
	3.4 Asociación con estaciones meteorológicas	60
	3.5 Resultado de cuencas, estaciones y períodos de calibración	68
CAP 4	PRECIPITACIONES: OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO A	71
	4.1 Identificación de grupos de estaciones	71
	4.2 Establecimiento del patrón de precipitaciones	73
	4.3 Selección de estaciones para caracterizar el régimen pluviométrico de las cuencas	74
	4.4 Análisis de consistencia de las estaciones seleccionadas	77
	4.5 Cálculo del parámetro A	78

CAP 5		PRECIPITACIONES: OBTENCIÓN DE FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIA	85
	5.1	Selección de estaciones para el análisis	85
	5.2	Día representativo de la serie	87
	5.3	Ubicación de las horas de lluvia dentro del día	89
	5.4	Factores de distribución horarios	90
CAP 6		EVAPORACIÓN: OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO B	93
	6.1	Establecimiento del patrón	93
	6.2	Relleno y verificación de estadísticas	95
	6.3	Cálculo del parámetro B	96
CAP 7		EVAPORACIÓN: OBTENCIÓN DE FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIOS	97
CAP 8		HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO	99
	8.1	Parámetros geomorfológicos	99
	8.2	Parámetros del HUS	101
	8.3	Ordenadas del HUS	104
CAP 9		OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO K DE EMBALSE	105
	9.1	Fundamento teórico	105
	9.2	Cálculo del parámetro K	107
CAP 10		METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS SEGÚN TÉRMINOS DE REFERENCIA	111
	10.1	Conductividad vertical Khid	111
	10.2	Determinación de los parámetros de suelo	113
CAP 11		CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EN CUENCAS SELECCIONADAS	119
	11.1	Generación de los archivos de entrada	119
	11.2	Relleno de las estadísticas diarias	121
	11.3	Proceso de calibración / validación	122
	11.4	Resultados de la calibración	124
	11.5	Comparación entre parámetros iniciales y calibrados	135

CAP 12		EXTENSIÓN DE PARÁMETROS HACIA EL RESTO DE LA ZONA DE ESTUDIO	137
	12.1	Definición del resto de la zona de estudio	137
	12.2	Regionalización de los parámetros calibrados	139
	12.3	Regionalización según parámetros iniciales	159
	12.4	Resultados de parámetros iniciales regionales	167
CAP 13		SIG Y MAPA	173
CAP 14		CONCLUSIONES	175
		ANEXO DIGITAL Y MAPAS	183
CD		ANEXO DIGITAL	
	2.4	Evaporación horaria	
	3.2	Gráficos QMM	
	3.3	Anexo fotográfico estaciones	
	3.4	Gráficos Q-P	
	4.1	Grupos de estaciones pluviométricas	
	4.2	Análisis doble masa precipitación	
	4.5	Cálculo de A	
	5.2	Coeficientes distribución horaria precipitación	
	6.1	Análisis doble masa evaporación	
	8.1	Hidrograma Unitario Sintético	
	9.2	Cálculo K	
	10.0	Metodología Detalle Parámetros	
	10.1	Cálculo Khid	
	10.2	Cálculo Hcc	
	10.3	Cálculo Parám. Suelo	
	11.0	Anexo Modelo	
	11.1	Elab Arch Calib	
	11.3.1	Gráficos Calibración Validación	
	11.4.1	Carpetas simulación parámetros calibrados	
	11.4.2	Cálculo Coeficiente Nash-Sutcliffe	
	12.2.1	SIG Suelos CIREN	
	12.2.2	Coef Nash Resumen	
	12.3.1	Simulaciones con parámetros iniciales originales	
	12.3.2	Regionalización	
	12.4	Carpetas simulación nuevos parámetros iniciales	
	13.0	SIG	
MAPAS		PARÁMETROS INICIALES REGIONALES	

CAPÍTULO 1**INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

El presente estudio se llama “Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en la VII y VIII Región”. Este estudio, llamado a licitación por la DGA a través de Chilecompra, con el código 1019-226-LP07, ha sido desarrollado por Rodhos Asesorías y Proyectos Ltda, y supervisado por el Departamento de Estudios y Planificación.

De acuerdo con los términos de referencia, el objetivo del presente estudio fue el de adecuar y calibrar las herramientas existentes de modelamiento hidrológico para poder generar o sintetizar información diaria de caudales en cuencas o subcuencas sin control fluviométrico, en las regiones VII y VIII del país.

Este requerimiento responde a la necesidad de la DGA de mejorar y agilizar la forma de constituir derechos de agua, debido a la creciente demanda por el recurso hídrico. En tal escenario, es necesario contar con herramientas adecuadas para abordar el mandato de asignar derechos de agua superficiales donde no hay control fluviométrico. En el mismo sentido, se están desarrollando modelos de mayor envergadura, como el MAGIC, para cuya aplicación es de gran utilidad contar con modelos de generación de aporte desde las subcuencas, como es el SIMED.

El modelo hidrológico de simulación de escurrimiento diario llamado SIMED está siendo desarrollado aproximadamente desde el año 2001, a partir del MOS, que es un modelo de generación mensual. Interesó, en la presente consultoría, analizar y aplicar este modelo, hacer sugerencias para su mejoramiento y evaluar la posibilidad de regionalizar los parámetros de calibración.

El modelo SIMED se calibra en base a ocho parámetros, los que interesa determinar para cada una de las cuencas y subcuencas pluviales de las regiones señaladas. Como el modelo se puede calibrar sólo en algunas cuencas, (las que cuentan con la información suficiente de entrada y con medición de caudales de salida), un objetivo del presente trabajo fue el de estudiar y analizar la posibilidad de la aplicación de los parámetros calibrados en el resto de las cuencas, a través de transposiciones y estimaciones basadas en el conocimiento del terreno y del comportamiento del modelo mismo.

Como resultado final del trabajo se esperaba obtener un mapa en formato shape, con la identificación de las cuencas y subcuencas estudiadas, y con coberturas que contuvieran los parámetros de calibración que se recomendaban como parámetros iniciales para cada una de ellas, en base al estudio realizado.

Por esta razón, se puso gran énfasis en determinar los parámetros de calibración, dándoles valores iniciales según las metodologías expuestas en los estudios anteriores, y presentadas más adelante en los capítulos correspondientes. En especial, se determinó en forma muy acuciosa, y de la forma que se señala, los siguientes parámetros:

- El parámetro A de precipitación, en base a curvas isohietas y polígonos Thiessen
- El parámetro B de evaporación, en base a curvas de isoevaporación
- Los factores de distribución horaria de la precipitación, en base a un análisis de tipo raster de la forma en que se presentan las lluvias durante los días de lluvia
- Los factores de distribución horaria de la evaporación, en base a curvas obtenidas en el exterior, pues no se encontró información de evaporación horaria en Chile
- El factor de embalse K del suelo, a partir del comportamiento de la recesión en períodos secos, observadas en estadísticas diarias de caudal
- El valor de Khid o permeabilidad del suelo, obtenido a partir de las recesiones de crecidas
- Los factores de humedad del suelo, Smin, Scrit y Scc, obtenidos de las tablas Ven Te Chow a partir del valor de Khid.
- Los otros parámetros del suelo, como porosidad efectiva, altura capilar, altura máxima de agua y altura del suelo, se desprenden también de una asociación con los anteriores.

Una vez obtenidos los parámetros iniciales, se calibraron todas las estaciones preestablecidas como aptas para calibración, llegándose a la conclusión de que los parámetros, una vez calibrados, no permiten una regionalización abarcando todas las cuencas pluviales, que era lo que se buscaba.

La regionalización de parámetros calibrados se intentó de varias formas:

- asociando los parámetros entre ellos
- asociando los parámetros con las características de suelos
- asociando los parámetros con características geomorfológicas del suelo
- realizando una revisión bibliográfica específica

En base a todo el análisis realizado, que se presenta en este estudio, se llegó a la conclusión de que los parámetros calibrados no son regionalizables.

En una reunión con el Jefe del Departamento de Estudios, él planteó la posibilidad de ampliar el análisis, buscando relacionar parámetros calibrados de cuencas con comportamiento hidrológico similar.

Se efectuó, entonces, un análisis ampliado, que abarcó lo siguiente

- las curvas de frecuencia de los caudales diarios observados en las estaciones de calibración
- las curvas de duración de caudales diarios en las mismas estaciones
- una apreciación visual de los hidrogramas
- una clasificación en base a rangos de precipitación.

Las estaciones efectivamente se pudieron agrupar de acuerdo con su comportamiento hidrológico. Sin embargo, los parámetros calibrados, promediados para un grupo, y aplicados a su propio grupo, no entregaron resultados satisfactorios, de modo que tampoco se obtuvo una forma de regionalizar parámetros a partir de esta metodología.

Se intentó lo mismo, manteniendo los valores de A y B individuales, pero promediando por grupo los valores calibrados de los demás parámetros, y se observó que tampoco son regionalizables con este procedimiento.

De esta manera, se llegó a la conclusión de que los parámetros, calibrados en la forma en que se había hecho, no son regionalizables.

En vista de este resultado, se retomó el estudio, intentando ahora regionalizar parámetros iniciales. Los parámetros iniciales obtenidos según la metodología señalada en los Términos de Referencia no dieron resultado en cuanto a regionalización. Por esto, se buscó una nueva forma de determinar parámetros iniciales, con mayor sentido físico, y esto se logró partiendo de las características de los suelos. Se clasificaron las cuencas de calibración en tres grupos, de acuerdo con su característica de textura:

- costeras finas
- costeras gruesas
- precordilleranas

Todos los parámetros se obtuvieron ahora a partir del tipo de suelo, y no del parámetro Khid, el cual se había obtenido, con gran variabilidad, de las estadísticas horarias de caudal.

Como parámetros A, B y K se utilizaron los parámetros antes obtenidos individualmente para cada cuenca.

Con estos parámetros iniciales, se pudo comprobar dos cosas:

- las estaciones resultan calibrables, esto es, calibran en base a ajustes no excesivos de los parámetros iniciales, que tienen un sentido físico
- los parámetros iniciales, por tener un sentido físico, son regionalizables, y se pueden regionalizar precisamente en base al tipo de suelo, de donde salieron.

Como resultado de todo el análisis, se presentan mapas con los parámetros iniciales con que puede iniciarse el modelamiento en cada una de las cuencas pluviales. Sin embargo, es necesario hacer énfasis en que se trata de parámetros iniciales, los que necesariamente deben ser calibrados en alguna estación de cierre.

Finalmente, del trabajo de levantamiento de información y calibración del modelo en las diferentes cuencas, también se desprendieron recomendaciones de mejoras, en especial para la parte operativa del modelo, además de la simplificación de los procedimientos de levantamiento de la información de entrada.

CAPÍTULO 2 **RECOPIACIÓN Y REVISIÓN DE ANTECEDENTES**

El presente capítulo contiene el resultado de la revisión de antecedentes que se realizó en la primera parte del estudio, con el fin de recabar antecedentes generales y específicos, tanto de cartografía, como de datos, estudios anteriores, conceptos incluidos en el modelo bajo análisis, experiencias anteriores con el modelo, experiencias internacionales de evaporación, y otros.

La revisión de los antecedentes y de la bibliografía afín se presenta a continuación.

2.1 ANTECEDENTES RECOPIADOS

Se revisaron todos los antecedentes relacionados con el presente estudio, en primer lugar los señalados en los Términos de Referencia, principalmente referidos a la modelación con SIMED, luego los antecedentes relacionados con los suelos en las regiones bajo análisis, y finalmente la bibliografía existente, tanto nacional como internacional, referida al tema de la evaporación horaria. También se recopilaron antecedentes básicos, como la imagen satelital de la zona de estudio, y los antecedentes existentes en SIG tanto en la DGA como en la CNR.

La revisión bibliográfica de los antecedentes relacionados con SIMED fue una revisión detallada, que tuvo por objetivo familiarizar al consultor con todas las metodologías, historia, antecedentes y resultados existentes en relación con el modelo, de modo de lograr una comprensión cabal de él y poder, luego del análisis y aplicación en las regiones VII y VIII, hacer proposiciones para su mejoramiento.

La revisión de los antecedentes de estudios de suelos se realizó con el fin de contar con antecedentes básicos de terreno para la determinación de los parámetros iniciales del modelo, 7 de los cuales se refieren al suelo (el modelo tiene 9 en total). De este modo, se apoya con antecedentes concretos la determinación teórica en que se basan los procedimientos propuestos.

La revisión de bibliografía referida a la evaporación horaria tuvo por objetivo contrastar los resultados de nuevas experiencias al respecto, con los resultados de la distribución horaria que se propuso en EEUU para el uso del modelo Sacramento, y que es de aplicación usual en Chile hasta el momento.

La forma de presentar la bibliografía, en general es la siguiente:

1. Identificación
 - Título completo
 - Autor
 - Mandante
 - Año
2. Objetivo del estudio
3. Contenido y resultados
4. Utilidad del estudio revisado para los fines del presente estudio.

La revisión bibliográfica se presenta ordenada cronológicamente, dentro de cada tema.

2.2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES SOBRE MODELACIÓN

2.2.1 Método para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos en Chile. Andrés Benítez - Cristian Rodriguez para ENDESA, 1974.

El objetivo de este trabajo fue adaptar para Chile las constantes del Hidrograma Unitario Sintético (HUS) de Snyder, ampliamente aplicadas en esa época en Chile, aun cuando habían sido obtenidas para el cordón montañoso de Los Apalaches en USA.

En la primera parte de esta publicación se señala la forma de obtener Hidrogramas Unitarios (HU) a partir de registros pluviométricos y limnigráficos, haciendo previamente el alcance de la importancia de referir los HU sólo al flujo superficial, restando por tanto el flujo base. Es decir, se introduce el concepto de la precipitación efectiva, como la parte de la precipitación que realmente escurre, definiéndola como el cociente entre el volumen escurrido y el área total de la cuenca, dejando fuera la parte que se infiltra -flujos subsuperficial y subterráneo - o flujo base. Se ejemplifica la forma de obtener el flujo base para luego a través de la integración de la curva q vs t sobre éste, determinar la lluvia efectiva o escorrentía directa.

Luego se define el HU como la escorrentía que produce una lluvia efectiva unitaria en un tiempo unitario. Posteriormente se señala la forma de derivar el HU de las crecidas registradas en cuencas físicamente caracterizadas a través de su superficie y distribución e intensidad de lluvias. Finalmente explica cómo se realiza el proceso para la obtención del HU adoptado de varias crecidas consideradas sin alcanzar un nivel de detalle que clarifique el método.

En la segunda parte va directo al objetivo de este trabajo. Para esto reseña las relaciones propuestas por Snyder, las cuales aparentemente, por lo que señala el texto, en un principio no incluyeron la pendiente de la cuenca, y las de Taylor-Schwarz quienes introdujeron la pendiente como variable y que llevaron sus resultados a un gráfico de fácil uso, de acuerdo a lo que se señala, pero que no se presenta en el estudio.

Luego de hacer algunos alcances sobre la aplicabilidad de HU en cuencas cercanas y de características similares sin información pluviométrica, y de la determinación de Hidrogramas Unitarios Sintéticos a partir de datos fisiográficos de la cuenca, se expone de lleno la metodología para la determinación de constantes y variables para HUS aplicables a cuencas chilenas. Las constantes se estiman a partir de un análisis de toda la información limnigráfica, disponible en esos años, traducida a Hidrogramas Unitarios de cuencas netamente pluviales.

Como resultado se llega a la conclusión de que para ajustar las relaciones de Snyder y de otros investigadores al caso chileno es necesario, por una parte, incorporar la variable de la pendiente de la cuenca y separar las relaciones para los casos al norte y sur del río Itata.

Efectivamente, los HU estudiados de cuencas con control fluviométrico pueden ser agrupados con sus respectivas constantes para las cuencas afluentes a los ríos Maipo – Rapel – Mataquito – Maule y las afluentes a los ríos Itata – BíoBío – Imperial – Valdivia, división que nace a partir de los climas imperantes en unas y otras cuencas y por ende de sus respectivas vegetaciones. Estas conclusiones llevan a formular las relaciones de los tiempos al peak (tp) y caudal peak (qp) para los HUS de una zona y otra como sigue:

Zona Maipo – Maule

$$tp = \frac{0.3 (L Lg)^{0.44}}{S^{0.22}}$$

$$qp = 269 tp^{-1.08}$$

Zona Itata – Valdivia

$$tp = \frac{2.6 (L Lg)^{0.18}}{S^{0.09}}$$

$$qp = 190 tp^{-0.865}$$

donde

- tp = tiempo al peak o tiempo de retardo de la cuenca, medido entre el tiempo medio de la lluvia unitaria y el momento del caudal peak, en horas
- qp = caudal peak o máximo del hidrograma unitario, para la lluvia unitaria, en l/s/km²
- L = longitud del cauce más largo de la cuenca, medido desde la divisoria hasta la salida de la cuenca, en km
- Lg = distancia entre el centro de gravedad o centroide de la cuenca, hasta la salida, medida por el cauce principal, en km
- S = pendiente media de la cuenca según Mociornita

Este documento es interesante sólo porque muestra la metodología que se aplicó originalmente para la determinación de los HUS en cuencas chilenas haciendo distinción entre las cuencas al norte y sur del Itata. Pero por la data del mismo, sus resultados son inaplicables al presente estudio ya que posteriormente se han reformulado los coeficientes de los tiempos al peak (tp) y de los caudales unitarios en el peak (qp), en los años 1985 (Arteaga-Benitez), 1995 (Ayala-Cabrera) y 2001 (Ayala).

2.2.2 Estudio integral de riego de la cuenca del río Maule. Parte IV (a) y (b). Estudio de recursos básicos. CEDEC para Comisión Nacional de Riego, 1977

Las partes IV (a) y (b) tienen como objetivo estimar las ofertas y demandas potenciales del recurso, tanto superficiales como subterráneas, para servir de base en dos aspectos: en la recomendación de diferentes tipos de cultivos aptos para la cuenca en los distintos períodos del año, en función del clima y suelo, y por otra, determinar la disponibilidad del recurso hídrico, para esos cultivos y otros usos en la cuenca del Río Maule. Esta información en este tipo de estudios sólo se logra si se estudian detalladamente y se vinculan todas las variables de recursos básicos que influirán posteriormente en la decisión del tipo de obras de riego pertinentes a la zona, el cual es el objetivo principal del estudio integral de riego del cual se ha revisado sólo las mencionadas partes.

El estudio se divide en tres partes: clima, suelo, y agua, superficial y subterránea.

En el estudio del clima en primer lugar se señalan los factores climáticos que rigen la cuenca como son la circulación general de la atmósfera, la influencia oceánica y la orografía; luego se presentan los elementos climáticos para la cuenca completa como son la precipitación, temperatura, humedad relativa, nubosidad, horas de sol y radiación solar, vientos y evaporación. A partir de éstos sigue un análisis que permite derivar los elementos agroclimáticos como son el periodo libre de heladas, los días-grado sobre 10°C, horas de frío con temperaturas inferiores a 7°C, evaporación potencial, regímenes hídricos, período de receso vegetativo, índice de humedad y los periodos secos y húmedos. Todos estos datos posteriormente permiten determinar la fórmula agroclimática, que separa en cuatro cuadrantes las caracterizaciones térmicas e hídrica, estivales e invernales de las distintas zonas de la cuenca, Finalmente todos estos datos se funden dando origen a los distritos agroclimáticos, sus respectivos parámetros y recomendaciones desde el punto de vista del clima para distintos cultivos. Algunos de estos datos se representan en cartas

En el estudio de suelos se realiza la descripción de los suelos usando como unidad de clasificación de los mismos las series, y como unidad cartográfica el tipo y la fase. Los tipos tienen relación con la textura de los suelos y las fases tienen relación con el manejo del suelo. La descripción se realiza a partir de las clases según su capacidad de uso, su adaptabilidad al riego y su aptitud agrícola y frutal.

En las caracterizaciones de los suelos se presenta la profundidad efectiva del suelo apto para la agricultura, la textura del suelo, factores limitantes como la capacidad de drenaje, inundación, pedregosidad, pendiente, ondulación y erosión.

En el estudio del agua se analiza la pluviometría y la fluviometría de la cuenca en su conjunto. Además analiza la disponibilidad del recurso de agua subterránea, la calidad del agua superficial y subterránea y sus usos.

Con relación a la pluviometría se analizaron 70 estaciones que por tener estadísticas de distintos periodos hubo que homologarlas, rellenando y extendiendo sus registros a través de los procedimientos habituales. El trabajo realizado para determinar el régimen pluviométrico de la cuenca, es a nivel mensual. Se presenta el análisis de las 7 estaciones más representativas de la cuenca, más el patrón. Se presenta como resultado, curvas de variación estacional de distintas probabilidades de excedencia para duraciones de 1 año. Luego se presenta la metodología para el trazado de las isoyetas de probabilidad de excedencia de 50%.

También se realizó un análisis de frecuencia a partir de 4 estaciones que presentaban mayor número de años con valores diarios máximos anuales; y un análisis de la variación de la precipitación en el tiempo a través de promedio móviles.

Las conclusiones obtenidas en este trabajo señalan que los factores de frecuencia son bastante homogéneos en toda la cuenca, concentrándose las lluvias en la temporada otoño – invierno. Se señala como importante el efecto orográfico, que se manifiesta en un aumento gradual de las precipitaciones desde el océano a la cordillera. Del análisis de las precipitaciones en el tiempo se desprende que existe una disminución de las mismas con los años para el periodo 1926-1976.

En cuanto a la fluviometría, al igual que en la pluviometría, el objetivo final del análisis es llegar a definir el régimen hidrológico de los ríos existentes en la cuenca del Maule que presenten estadísticas confiables. Para este efecto se analizaron 82 estaciones para las cuales se verificó la bondad de sus datos; se separaron las cuencas en dos zonas, aguas arriba de Colbún y resto de la cuenca. Como estadísticas básicas se determinó que eran útiles las de Afluente a Laguna Invernada en la parte alta, a la cual se asociaron 10 estaciones en condiciones de ser ampliadas y estudiadas, y Longaví en Quiriquina en la parte baja, a la cual se asociaron 14 estaciones para ser ampliadas y estudiadas. El análisis en cada una considera la interrelación de volúmenes de regulación y canales. Finalmente se estableció el régimen hidrológico para distintas probabilidades de excedencia y las producciones específicas, anuales medias y estacionales, en cada uno de los ríos estudiados, el cual es descrito y representado gráficamente para cada uno de ellos detalladamente.

Adicionalmente se presenta un análisis de precipitación – escorrentía de las cuencas de la parte baja a partir del plano de isoyetas de probabilidad 50%, el caudal medio anual y la superficie de la cuenca. Las isohietas 50% se transforman a precipitaciones medias anuales. El valor es comparado con los resultados que da la fórmula de Grunsky para la escorrentía a partir de la precipitación.

También se entregan antecedentes de pérdidas y recuperaciones, se estiman los caudales diarios e instantáneos extremos y se comparan los factores de frecuencia para todas las estaciones estudiadas, entregando como resultado factores de frecuencia generalizados

para toda la cuenca y distintos periodos de retorno a partir del periodo de retorno de 10 años.

Respecto del agua subterránea, previo a su análisis se presenta una reseña detallada de la geomorfología y geología de la cuenca del Maule describiendo cronológicamente las formaciones que la componen. Luego se describe la geología de superficie de la hoya hidrográfica con antecedentes que se han obtenido de los sondeos perforados en la zona dando cuenta de las unidades geológicas que evidencian algún grado de permeabilidad. El resultado de esta investigación llega a establecer la potencia de los acuíferos principales en los sectores “Norte”, al norte del río Maule, “Centro” entre los ríos Maule y Liguay y “Sur” al sur del río Liguay.

En relación con la hidrogeología de la cuenca, el estudio da cuenta de las características de potencia, profundidad y constantes elásticas, señalando que las potencias de los acuíferos en general son bajas, menores a la decena de metros encontrándose en estado de confinamiento o semiconfinamiento en prácticamente toda la cuenca. Se calculan para los acuíferos considerados de las distintas áreas los coeficientes elásticos de transmisibilidad y de almacenamiento según distintos métodos. Luego se cuantifican las recargas del sistema provenientes directamente de las parte de las precipitaciones que se infiltran y de las provenientes del riego.

También se realiza un análisis de las conexiones de los acuíferos con los ríos sin llegar a establecer relaciones claras en el tiempo, sólo puntuales, básicamente ligadas a las precipitaciones y al riego. Este análisis se realiza para varios ríos. Posteriormente se realiza un análisis del movimiento de las aguas subterráneas a través de las líneas equipotenciales, identificando una zona norte, centro y sur, llegando a determinarse que en el área norte (Río Claro) en general éstas se desplazan hacia la salida natural del valle central en ese sector, en el área centro el movimiento general es en sentido este-oeste; y en el área sur la dirección del escurrimiento conduce el agua subterránea desde las áreas superiores (Perquillauquen superior) hacia aquellas áreas de cota inferior (Perquillauquen inferior). En general, el patrón de escurrimiento subterráneo sigue el patrón del drenaje superficial.

Luego del estudio de las descargas del agua subterránea en los cauces superficiales, separándolas en naturales y artificiales, el informe entrega en detalle las profundidades del nivel estático de los acuíferos estudiados en la cuenca del Maule.

Finalmente se presenta un balance hidrogeológico para los sectores norte, centro y sur. En el caso del sector norte se desprende del estudio un desbalance positivo de 4.51 m³/seg, en tanto que para el sector centro y sur un desbalance positivo de 43.37 m³/seg.

En un capítulo aparte se analiza la calidad del agua a través de exámenes físico-químicos. Este estudio se esperaba que fuera de utilidad para obtener las características detalladas de clima, suelo, geología, hidrogeología y condiciones generales del comportamiento del

recurso hídrico, en especial para la transposición de parámetros una vez calibrado el modelo en las diferentes cuencas aptas para ello. Además, se considera un gran aporte las estadísticas rellenadas, corregidas y homogeneizadas para el período de 30 años anteriores a 1976.

2.2.3 Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá, Colombia, Chow, V. T.; Maidment, D. R.; Mays, L. W., 1994

Este libro es didáctico, de modo que el objetivo es presentar un compendio del conocimiento de cada uno de los temas tratados. El tema que interesó revisar en este tomo fue el de la infiltración, donde se presenta el método Green-Ampt para estimar el proceso de infiltración de agua en el suelo, método que utiliza el modelo SIMED.

Se aclaran conceptos como la zona de saturación, la zona de transmisión, la zona de mojado y el frente de mojado. En base a la presentación de la ecuación de Richards, y dos formas de obtener soluciones particulares aproximadas, la ecuación de Horton y la de Phillip, se presentan los conceptos de tasa de infiltración f , potencial y real, y la infiltración acumulada en un período de tiempo F , y se ejemplifican conceptos como la fuerza de succión por adsorción del suelo, S , y la conductividad hidráulica, K .

A continuación, se presenta el método de Green y Ampt, que se basa en asumir una realidad simplificada, pero que tiene una solución exacta. Los parámetros que definen la ecuación de Green y Ampt son los siguientes:

- la conductividad hidráulica K
- la porosidad η
- la porosidad efectiva θ_e
- la presión de succión del suelo en el frente de mojado, ψ

En base a ellos se obtienen los valores de f y F .

Los parámetros se presentan en forma interdependiente, en una tabla que resume los resultados del análisis de 5000 horizontes de suelo llevados a cabo en EEUU. Los parámetros η y θ_e no presentan rangos muy grandes de variación. Para los parámetros K y ψ , hay que considerar que los rangos de variación pueden ser considerables.

Luego se presenta el modelo de Green-Ampt para un suelo de dos capas, el cual se aplica una vez que el frente de mojado ha atravesado un horizonte de suelo más permeable y entra en uno menos permeable.

El modelo SIMED usa en su lógica, una sola capa de infiltración.

Hasta aquí, el método de Green-Ampt presenta soluciones solamente para una superficie encharcada, es decir, que aporta al suelo toda el agua que éste potencialmente puede

infiltrar. Como esto no es real, es necesario introducir el concepto de tiempo de encharcamiento, que es el tiempo que demora el suelo en encharcarse después de que ha comenzado una lluvia. De acuerdo con las ecuaciones de Green-Ampt, el tiempo de encharcamiento se obtiene en función de las características del suelo, y la intensidad de la lluvia.

El modelo SIMED incorpora en su lógica, el tiempo de encharcamiento, t_p .

Finalmente, el artículo entrega una tabla que resume todas las fórmulas que entregan todos los métodos expuestos, para calcular tasa de infiltración potencial en función del tiempo, infiltración acumulada potencial, tiempo de encharcamiento, infiltración acumulada después de encharcamiento y tasa de infiltración después de encharcamiento.

El análisis de este capítulo permite comprender la forma en que el modelo SIMED simula la infiltración de lluvias al suelo. La aplicación práctica del modelo, sin embargo, no permite, dentro de los alcances y limitaciones de plazo del presente estudio, hacer proposiciones de mejoramiento a los conceptos utilizados en su formulación.

2.2.4 Caracterización de condiciones meteorológicas durante eventos de precipitación a los 33° LS de Chile. Cristian Soto, Ludwig Stöwhas, basado en la memoria de título de Cristian Soto, Noviembre 2003

El objetivo de este trabajo fue el de hacer un análisis estadístico de la duración y recurrencia de las tormentas, y de encontrar patrones de comportamiento que relacionan tales tormentas con los perfiles en altura de las variables temperatura, humedad y velocidad del viento.

En primer lugar, se realizó en 7 estaciones pluviométricas, un análisis de días de lluvia al año, para distintos montos de precipitación (lloviznas, lluvias normales, lluvias intensas, previamente definidas). A continuación, se determinó las duraciones reales de cada tipo de lluvia, en horas, a partir de pluviogramas. Finalmente se graficó, para cada evento de lluvia, sus valores de presión, temperatura y velocidad del viento.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- El número de días de lluvia moderada supera el número de días de lluvia intensa, y éste, el número de días de lloviznas.
- Duraciones en la cordillera superan en promedio en un 70% las duraciones de los eventos en el litoral.
- Lloviznas presentan temperaturas levemente más altas que lluvias moderadas, y éstas a su vez, temperaturas levemente más altas que las lluvias intensas.
- Lloviznas presentan velocidades del viento transversales a la costa, más bajas que lluvias moderadas, y éstas a su vez, más bajas que las lluvias intensas.

En el presente estudio, este trabajo se consultó con el objetivo de conocer la forma en que se han clasificado las lluvias. Esta clasificación en tres tipos de lluvia según intensidad es la que se ha usado en relación con la aplicación del SIMED en la cuenca del Maule, y es la que se usó también en el presente estudio. No obstante lo anterior, en el presente estudio se propuso una nueva forma de distribución horaria de las lluvias, basada en la caracterización diaria en vez de la caracterización del temporal.

2.2.5 Modelo de Simulación de Caudales Medios Diarios en Cuencas Pluviales. Pablo Isensee para: Dirección General de Aguas, 2003

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo matemático que permitiera predecir la escorrentía directa y base de una cuenca pluvial a través de un análisis teórico, como es la simulación de caudales medios diarios, a partir del balance hidrológico a nivel horario de datos históricos, como son las precipitaciones horarias existentes en distintas estaciones que registran dichas precipitaciones; y datos supuestos, con una base real, como son la evaporación horaria, grado de saturación del suelo, conductividad hidráulica, constante de tiempo del embalse subterráneo, altura de capilaridad y porosidad efectiva del suelo.

El modelo se desarrolla sobre una base conceptual concreta, que combina las variables que describen los fenómenos físicos que intervienen en distintos niveles, para el cálculo de la escorrentía total. El modelo desarrolla ecuaciones de baja complejidad resolutive por lo que al ser operadas desde un ordenador resultan de fácil ejecución.

La obtención de parámetros se apoya en el resultado de estudios nacionales relacionados como son el de “Caracterización de Condiciones Meteorológicas durante Eventos de Precipitación a la Latitud 33°”, “Criterios para la Caracterización y Selección de Lluvias de Diseño”, una memoria de título sobre la distribución horaria de la evaporación, el método de Green Ampt para la infiltración y la forma de cómo se comporta el caudal en el tiempo a través de la construcción de un Hidrograma Unitario Sintético.

Las variables que calcula el programa para simular los caudales son:

- escorrentía directa
- infiltración
- precolación profunda
- escorrentía subterránea
-

Los datos y parámetros utilizados para determinar estas variables son:

- precipitación horaria
- evaporación horaria
- grado de saturación del suelo
- conductividad hidráulica del suelo
- ordenadas del hidrograma unitario sintético

- constante de tiempo del embalse
- altura de capilaridad
- porosidad efectiva

El programa está escrito en Turbo Pascal, programa que permite realizar procedimientos en forma estructurada a través de subrutinas, apropiadas en este caso para estimar las distintas variables que intervienen en el flujo total, esto es, el flujo de escorrentía directa a través de los registros de lluvias y de evapotranspiración, más el flujo base a partir de la infiltración, percolación y escorrentía subterránea.

Finalmente se realiza una aplicación en la cuenca del Lliu-Lliu, en la subcuenca “Vertedero Oriente” de 26 km², contrastando los resultados con los medidos el año hidrológico 1966/1967. Los resultados obtenidos no son analizados.

Este trabajo fue fundamental en el desarrollo de esta consultoría por tratarse del estudio que sentó la base teórica para la modelación hidrológica de los caudales medios diarios en cuencas pluviales incorporando un programa computacional de fácil manejo para este fin.

2.2.6 Modelo de Simulación de Escorrentía Diaria para Cuencas Pluviales SIMED. Calibración y Validación en la Cuenca del Río Purapel, VII Región. Informe Técnico. Departamento de Estudios y Planificación. S.I.T N°93 Dirección General de Aguas, 2004

Este estudio correspondió al informe de práctica profesional del Ingeniero Miguel Angel Caro. El objetivo de este estudio fue presentar un caso de calibración y validación del modelo matemático SIMED, de caudales medios diarios en la cuenca de Purapel. El programa SIMED fue desarrollado para la DGA, originalmente en lenguaje Turbo Pascal, por el Ing. Sr. Pablo Isensee, y adaptado al lenguaje Delphi 7.0 por el Ing. Mauricio Zambrano.

El informe detalla todo el trabajo involucrado en la alimentación del programa para generar los resultados deseados, esto es la simulación de los caudales medios diarios.

Para esto se realiza el análisis de las lluvias de las estaciones seleccionadas así como también de su respectivo patrón para el posterior relleno de los registros. Se seleccionan dos años para la calibración, uno lluvioso que realce el peak de la crecida y otro normal. La relación del caudal con el tiempo se obtiene de la aplicación del HUS adaptado por Ayala el año 2001.

Luego se señalan las condiciones iniciales que deben definirse para el modelo, como son el grado de saturación del suelo y el flujo subterráneo; y la forma de obtener los parámetros iniciales para la calibración como son el coeficiente A de la precipitación, el

coeficiente B de la evaporación, la porosidad efectiva, la altura capilar, la conductividad hidráulica del suelo, la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la lámina de agua contenida en el suelo saturado, la constante de embalse subterráneo, y el área de la cuenca. En teoría todos estos parámetros, para ser ingresados al programa, requieren de un análisis previo que permita establecer el grado de representatividad de los fenómenos reales.

Sensibilizando cada parámetro, se hace un análisis de bondad de ajuste del modelo, que se evalúa con los estimadores: raíz del error cuadrático medio RMS, RMS normalizado, error promedio, desviación estándar del error y el coeficiente de determinación R. Así se obtiene un set inicial optimizado de parámetros, para iniciar la calibración.

Dada la representación de caudales que se logra con los parámetros preliminares, el ajuste se busca efectuado las siguientes modificaciones: bajando A, subiendo la porosidad efectiva, bajando la conductividad hidráulica del suelo, subiendo la capacidad de campo, bajando la máxima lámina de agua en el suelo, y bajando el coeficiente de embalse K, hasta lograr el mejor ajuste.

Finalmente se procede a validar el modelo obtenido, con la estadística de un año en particular, el año 1999. Se observa en la validación que el modelo tiene problemas para reproducir la señal amortiguada en épocas de bajas precipitaciones, y también para reproducir los peaks.

Como conclusiones del estudio se obtienen las siguientes:

- el modelo calibra con sus parámetros dentro de rangos físicos válidos
- en la débil representación de los peaks, el modelo refleja las simplificaciones que incorpora el modelo de Green Ampt, tanto en la asunción de una conductividad hidráulica constante en vez de variable con la humedad del suelo, como en el avance del frente húmedo, abrupto en vez de gradual.
- una vez obtenido un buen ajuste, subiendo la porosidad efectiva, se puede subir el valor de A, y
- subiendo el valor de la humedad máxima del suelo, se puede subir la constante de embalse K.
- un valor bueno de los estadísticos típicos de medida del error, no asegura un buen ajuste
- la calidad del ajuste depende fundamentalmente de los parámetros porosidad efectiva, conductividad hidráulica y constante de embalse.

En el Cuadro N° 1 se presentan los efectos de la variación de los parámetros, y los valores recomendados.

Cuadro N° 1
Efectos de la variación de parámetros y valores recomendados

Parámetro	Valor Aumenta	Valor Recomendado
Grado de Saturación ° / 1	Aumenta peak inicial. Si GS>0,4 aparece nuevo peak al inicio	GS < 0,4
Flujo Subterráneo Inicial m^3/seg	Señal no cambia para FS < 0.8, si FS>0,8 m3/s aparece peak al inicio que aumenta progresivamente	FS < 0,8 m3/s
A ° / 1	Señal aumenta su amplitud y flujo base	A > 0,5
B ° / 1	No tiene efectos	
PorEf ° / 1	Disminuye definición y peak de señal Asimétricamente (mayor efecto al inicio)	~ 0.4
Hcap mm	No tiene efectos	
Khid mm/hr	Disminuye definición, suaviza y sincroniza señal, amplitud disminuye al principio y final de la señal mientras que en la parte central aumenta para Khid < 6. Si Khid > 6 señal toma forma definitiva peaks aumentan, aumenta flujo base. Si Khid > 1000 no hay efectos.	4 < Khid < 6
Scc ° / 1	Disminuye peaks inicial, aumentan finales, aumenta definición	
Smin ° / 1	No tiene efectos	
Hsuelo mm	Disminuye peaks iniciales, disminuye definición	
K hr	Disminuye definición, peaks, aumenta flujo base	K ~ 100

Este trabajo sirvió como guía para la realización de la primera parte del presente trabajo, y en especial para la calibración, básicamente porque muestra en forma práctica el orden en que se deben ser movidos los parámetros de forma tal obtener el mejor ajuste.

2.2.7 Modelación hidrológica de cuencas pluviales, hoya hidrográfica del río Maule, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, y Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación. Publicación DGA SIT 110, Diciembre 2005.

El objetivo de este trabajo fue el de aplicar dos modelos de simulación de escorrentía en diversas cuencas pluviales de la hoya hidrográfica del río Maule, el SIMED y el SACRAMENTO, calibrarlos y validarlos, y luego comparar los resultados de ambos modelos. Además se buscaba analizar la forma de aplicar el SIMED en cuencas sin observaciones fluviométricas.

Los resultados del estudio se refieren a cada uno de los subobjetivos planteados dentro del objetivo. Así, los contenidos y resultados relevantes del estudio, fueron los siguientes:

- A Una metodología para preparar la aplicación del modelo SIMED a cuencas pluviales con control fluviométrico, en las cuales es calibrado y validado. La metodología consiste en los siguientes procedimientos.
 - Definición de cuencas para la cuenca del Maule (en realidad, la definición de cuencas se tomó de la definición realizada en la DGA para aplicar el modelo MAGIC)
 - Identificación de las cuencas que pueden considerarse pluviales
 - Identificación de las cuencas pluviales cuyo régimen hidrológico debe considerarse alterado por la intervención antrópica, para descartarlas del análisis
 - Identificación de cuencas aptas para calibración (son tres)
 - Identificación de períodos en las estadísticas de precipitaciones y caudales (no alterados), aptos para calibrar y validar los modelos.
 - Definición del período de calibración y validación en cuencas de calibración
 - Obtención de la estadística de entrada al modelo SIMED:
 - Lluvia diaria
 - Caudales medios diarios observados
 - Evaporación mensual
 - Ordenadas del hidrograma unitario de cada cuenca, previa obtención de:
 - parámetros geomorfológico de las cuencas de calibración para aplicación del HUS

- parámetros propios del HUS según Arteaga y Benítez (1974)
 - Valores de distribución horaria de evaporación (según modelo Sacramento u otro)
 - Valores de distribución horaria de la lluvia de acuerdo con la metodología desarrollada por Soto y Stöwhas en 2003, y aplicando factores de distribución horaria según Espíldora y Echavarría, 1979.
- Valores iniciales de parámetros del modelo SIMED
 - Parámetro de precipitación A (relaciona la lluvia promedio de la estación con la lluvia promedio sobre la cuenca, la que se obtiene de las isolíneas de precipitación de la DGA)
 - Parámetro de evaporación B (relaciona la evapotranspiración promedio de la estación con la evapotranspiración promedio de la cuenca. Se obtiene de los datos de evaporación de bandeja, y luego se corrige por un factor de bandeja.)
 - Constante de embalse subterráneo K. Esta constante se obtiene como el recíproco de la pendiente de la curva $\ln Q(t)$ versus tiempo, en período de recesión. Se usa el promedio de varias recesiones.
 - Permeabilidad hidráulica del suelo, Khid. Se obtiene en función de dos valores del flujo base en una gran crecida, el tiempo t que los separa y la constante K del acuífero.
 - Altura de agua correspondiente a la capacidad de campo, hcc (altura de agua no disponible para drenar libremente). Se obtiene como la suma de las precipitaciones después de un período largo seco y antes del aumento brusco del hidrograma de crecidas correspondiente.
 - Parámetros de humedad del suelo: capacidad de campo Scc, punto de marchitez permanente Smin y parámetro Scrit: Se obtienen a partir del valor de Khid del suelo (Khid según se señala antes o de acuerdo con estudios de suelo para el sector) y de los parámetros asociados de Green-Ampt, los cuales se introducen en un programa de triángulo textural del suelo, el cual entrega Smin, Scc y Scrit.
 - Profundidad del suelo. Se obtiene a partir de los valores de Scc, hcc y porosidad total, que permiten estimar la altura total del suelo o profundidad comprometida en el análisis.
 - Porosidad efectiva y altura capilar. Se obtienen directamente de la tabla de parámetros de Green-Ampt.
- B. El proceso de calibración, en que se muestran los parámetros iniciales y finales logrados con la calibración.

- C. Presentación del modelo Sacramento
- D. Determinación de parámetros del modelo Sacramento:
- Capacidad del estanque de agua libre en tensión de la zona alta
 - Fracción de la cuenca temporalmente impermeable
 - Máxima fracción de la cuenca temporalmente impermeable
 - Tasa de recesión diaria del estanque de agua libre primario
 - Capacidad del estanque de agua libre primario
 - Tasa de recesión diaria del estanque de agua libre suplementario
 - Capacidad del estanque de agua libre suplementario
 - Tasa de recesión diaria del estanque de agua libre de la zona alta
 - Capacidad del estanque de agua libre de la zona alta
 - Capacidad del estanque de agua en tensión de la zona baja
 - Fracción de la percolación que se distribuye entre los estanques de agua libre de la zona baja, cuando existe deficiencia de agua en tensión de la zona baja
 - SARVA (agentes que generan evaporación y evapotranspiración)
 - ZPERC ó Z, y REXP (relacionados con la percolación)
 - SIDE (relacionado con flujo base)
 - RSERV (aguas fijas en estanque libre de la zona baja)
 - SSOUT (flujo que se pierde en el lecho)
 - PX-ADJ, PE-ADJ (corresponden al A y B del SIMED)
- E. Calibración del modelo Sacramento
- F. Análisis de sensibilidad grueso de parámetros del modelo SIMED.
De este análisis, resultó que los resultados son sensibles frente a variaciones de los siguientes parámetros:
- A
 - Khid mientras son pequeños (bajo 9 mm/h)
 - Scc bajo 0.4
 - H suelo bajo 290 mm
 - la constante de embalse K
- Por el contrario, no hay gran sensibilidad frente a la variación de los siguientes parámetros:
- B
 - Pef
 - Hcap
 - Khid sobre 9 mm
 - Scc sobre 0.4
 - Hsuelo sobre 280 mm.
 -

- G. Análisis de sensibilidad grueso del modelo Sacramento frente a variaciones de sus parámetros.
Este análisis no se presenta aquí, debido a que no se trabajará con el modelo Sacramento en este estudio.
- H. Análisis de sensibilidad fino del modelo SIMED
Este análisis se lleva a cabo para analizar la estabilidad de la solución de los parámetros finales de calibración. La variación de los parámetros en un rango de 95% a 105% del valor de calibración mostró que la solución efectivamente era estable.
- I. Análisis de sensibilidad fino del modelo Sacramento
Este análisis distingue cuáles son los parámetros de mayor sensibilidad de respuesta, y los de menor sensibilidad de respuesta. No se profundiza este tema aquí, debido a que no se trabajará con el modelo Sacramento.
- J. Conclusión del análisis de sensibilidad:
Para el modelo SIMED, se sintetiza el análisis de sensibilidad en los siguientes cuadros:

Cuadro N° 2
Grado de influencia de los diferentes parámetros

Grupo (influencia)	Parámetro
1 (mucha)	A
	Khid
	K
2 (mediana)	B
	PorEf
	Scc
	Smin
	Hsuelo
3 (ninguna)	Hcap

Cuadro N° 3
Efectos de la variación de los parámetros en la respuesta del Modelo SIMED

Parámetro	Valor Aumenta
-----------	---------------

A	° /1	Señal aumenta su amplitud y flujo base
B	° /1	Disminuye amplitud de señal notablemente en los períodos de estiaje.
PorEf	° /1	Disminuye definición y peak de señal Asimétricamente (mayor efecto al inicio)
Hcap	mm	No tiene efectos
Khid	mm/hr	Disminuye definición, suaviza y sincroniza señal, amplitud disminuye al principio y final de la señal mientras que en la parte central aumenta. Si Khid > 1000 no hay efectos.
Scc	° /1	Disminuye peaks inicial, aumentan finales, aumenta definición
Smin	° /1	Aumenta la amplitud de señal en períodos pre y post húmedos.
Hsuelo	mm	Disminuye peaks iniciales, disminuye definición
K	hr	Disminuye definición, peaks, aumenta flujo base

Para el modelo Sacramento, se sintetiza el análisis de sensibilidad en el siguiente cuadro:

Cuadro N° 4
Grado de influencia de los diferentes parámetros

	Grupo		
	1	2	3
Parámetros	LZFPM	ADIMP	SSOUT
	LZFSM	PCTIM	RSERV
	LZPK	SIDE	PFREE
	LZSK	UZWWM	SARVA
	LZTWM		
	REXP		
	UZFWM		
	UZK		
	ZPERC		

- K. Análisis comparativo de los Modelos SIMED Y SACRAMENTO
En el análisis comparativo se señalan las diferencias conceptuales entre ambos modelos. Como las más importantes, aparecen las siguientes:

- El modelo SIMED utiliza 9 parámetros de calibración, mientras que el Sacramento requiere 19, lo que facilita sustancialmente la calibración del primero.
- Debido a lo anterior, el modelo Sacramento reproduce mejor las recesiones de los diferentes tipos de crecidas, porque sus parámetros permiten simular 4 tipos de flujo en la recesión, mientras que el modelo SIMED considera sólo 2.
- Si se está interesado en reproducir bien los valores medios, esto se puede lograr adaptando bien los parámetros.

Finalmente el estudio entrega una metodología de calibración, de gran interés para el trabajo en curso, que consiste en:

- Trabajar sobre el parámetro K del embalse subterráneo, hasta lograr el ajuste de la recesión requerida. (K alto, sobre 1000 horas, para flujo primario, y K bajo, < 100 horas, para flujos intermedio y suplementario).
- Ajustar los peaks a través del aumento paulatino del valor de K_{hid} , partiendo de un valor bajo, por ejemplo, 1 mm/h.
- Afinar detalles modificando A
- Si persisten problemas en los períodos pre y post invernales, mover los parámetros del grupo 2, comenzando con B.

L.

Conclusiones y recomendaciones

Se hace énfasis en la bondad de ajuste que se logra con un modelo sencillo como el SIMED. También se hace énfasis en la metodología simple que se desarrolla para la determinación inicial de los parámetros de calibración. Por último, se indica como un resultado inesperado del estudio, el método para obtener la conductividad hidráulica del suelo sin ensayos de terreno, a partir del flujo base de los hidrogramas de crecidas y del parámetro K del embalse lineal. Se señala que uno de los problemas que debieran ser solucionados es el de determinar mejor la evaporación horaria que el modelo requiere y que obtiene de una distribución estándar de la evaporación diaria.

Este estudio fue de gran utilidad en el sentido de que muestra toda la metodología de trabajo que se usa para aplicar el modelo SIMED, y que fue la que se usó en la primera parte del presente trabajo. Además, expone una forma optimizada para lograr la calibración.

2.2.8 Breve descripción del modelo SIMED, basada en el trabajo “Método para la determinación de los valores iniciales de los parámetros del modelo SIMED” presentado por el Ingeniero Civil Hidráulico Miguel Angel Claro H. en el XIII Congreso Chileno de Hidráulica.

El modelo SIMED es un modelo matemático desarrollado para la simulación de caudales medios diarios en una cuenca de régimen pluvial. La generación de estos caudales medios diarios, se realiza a través de un programa desarrollado por el ingeniero civil Sr. Pablo Isensee M. en lenguaje turbo Pascal y adaptado al lenguaje Delphi7.0 por el ingeniero civil Sr. Mauricio Zambrano.

La Figura N°1 a continuación muestra un diagrama esquemático del modelo SIMED. En este modelo el ciclo hidrológico se describe a través de un sistema que considera los procesos de evapotranspiración, infiltración, almacenamiento de humedad, generación de escorrentía directa, percolación profunda y flujo base, los cuales se evalúan a nivel horario.

La lluvia que cae sobre la cuenca, lo hace sobre un manto permeable en el cual se generan los procesos de infiltración, evapotranspiración, percolación profunda y escorrentía.

La contabilización de la humedad, se realiza en esta capa de suelo superficial considerando un estanque ficticio en la parte alta, el cual tiene como variable de estado la proporción de humedad acumulada. En este estanque, se efectúa en forma horaria un balance hídrico, que permite satisfacer las necesidades de evapotranspiración y establecer la magnitud de la percolación profunda si los niveles de humedad remanente en el estanque lo permiten.

Si la intensidad de la lluvia es mayor que la tasa de infiltración, se establece la escorrentía directa, la cual escurre superficialmente a una tasa determinada por el hidrograma unitario de la cuenca. La lluvia efectiva se define como la diferencia entre la lluvia y la infiltración horaria.

La infiltración es determinada mediante el método propuesto por Green y Ampt (1911); este método modela la humedad en la zona no saturada como un flujo pistón, el frente de mojado es un frente brusco sobre el cual el suelo se encuentra saturado, y bajo él se tiene la humedad antecedente del intervalo anterior. La tasa de infiltración resulta proporcional a la variación de humedad inducida por este frente. Las ecuaciones resultantes son de fácil integración y se detallan página 112 de “Hidrología Aplicada” de V.T. Chow.

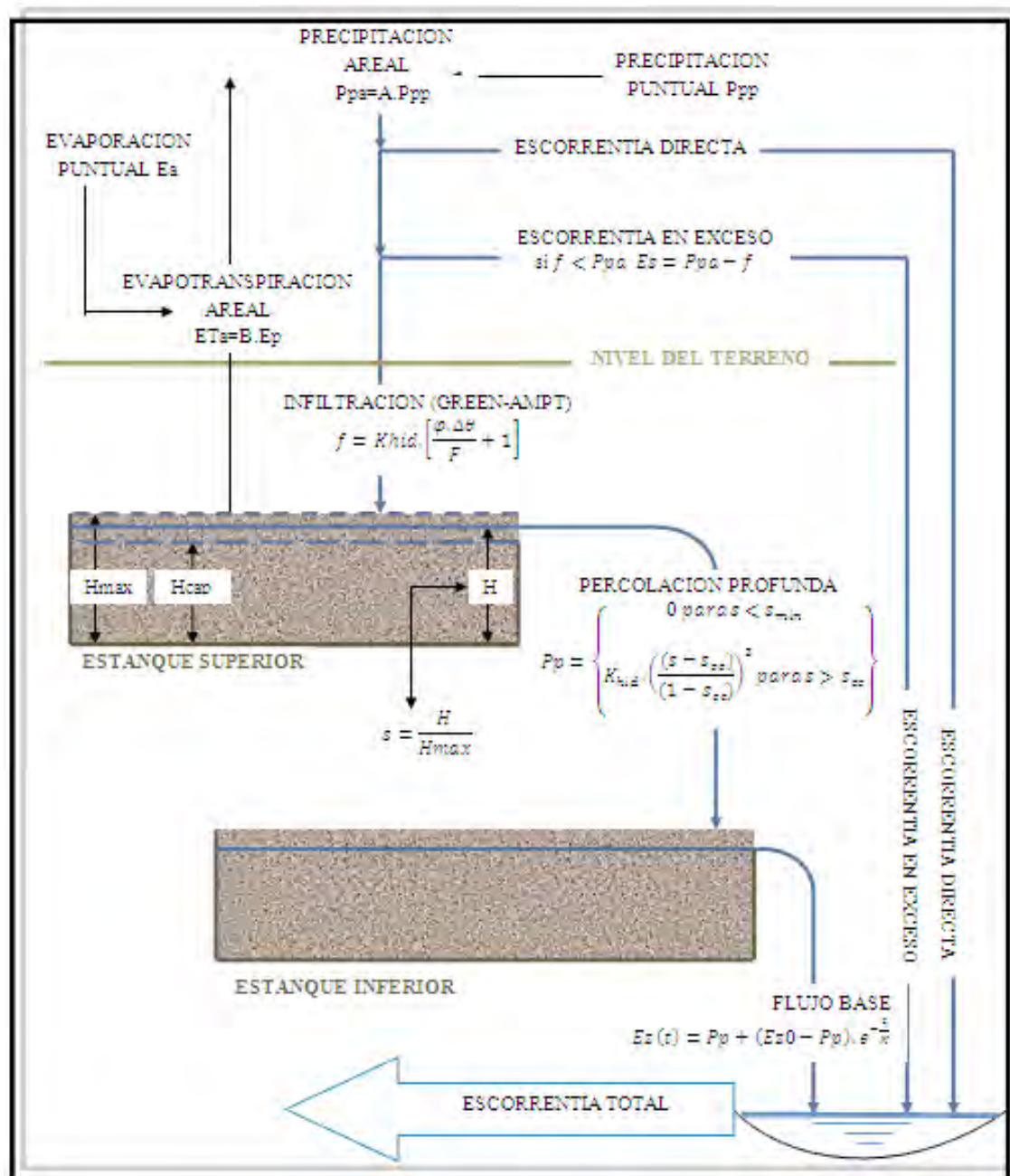
La percolación profunda sólo ocurre cuando el nivel de humedad remanente del estanque superior, después de satisfechas las necesidades evapotranspirativas, supera la humedad equivalente a la capacidad de campo. Cuando esto sucede, el estanque superior derrama agua sobre el estanque inferior, encargado de generar el flujo base.

El estanque inferior se comporta como un embalse lineal, con lo que el flujo base es proporcional al volumen embalsado, y su tasa depende exponencialmente de una constante de tiempo.

El modelo utiliza como datos de entrada la lluvia diaria y evaporación mensual sobre la cuenca, los cuales son convertidos en magnitudes horarias a través de tablas de distribución horarias para la lluvia y evaporación de la cuenca; además se requiere un conjunto de parámetros cuyos valores dependen de las propiedades más comunes del suelo.

Todo lo señalado permite que la cantidad de parámetros a los cuales hay que asignar un valor inicial, sea considerablemente menor que para otros modelos.

Figura N° 1
Diagrama conceptual del modelo SIMED



2.3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES SOBRE SUELOS

2.3.1 Proyecto de regadío canal Bío Bío Sur 2ª Etapa. Estudio Agroeconómico. Ministerio de Obras Públicas, Enero 1964

Este trabajo contiene un estudio de suelos para la parte sur de la cuenca del río Bío Bío. En él se distinguen suelos de lomajes, suelos planos de valles y terrazas, suelos de riego de las categorías II a V, y suelos fuera de riego.

Esta información está digitalizada por CIREN y se encuentra disponible para la venta en forma de coberturas de los distintos parámetros. Fue adquirida en especial para apoyar el intento de regionalización de los parámetros de calibración.

2.3.2 Estudio integral de riego de la cuenca del río Mataquito. Prefactibilidad. Tomo C: Suelos. B&P, CICA, HTS para Comisión Nacional de Riego, Marzo 1978

El objetivo de este estudio fue hacer una caracterización detallada de la cobertura de suelos de la cuenca.

En relación con los suelos, el estudio contiene una detallada descripción de todos los suelos que se encuentran en la cuenca, esto es, de su textura, capacidad de uso según clases, clasificación para riego según categorías, aptitud agrícola y aptitud frutal. También contiene los mapas a escala 1:20.000 con la información espacializada. Estos antecedentes son los que están consignados también en el SIIR de la CNR.

Este estudio se revisó con el fin específico de obtener información sobre los suelos de la cuenca. Finalmente, esta información se incorporó al estudio en forma de coberturas, digitadas por CIREN con fines comerciales.

2.3.3 Suelos de la cuenca del río Bío Bío. Características y problemas de uso. Serie: Análisis territorial volumen 3. P. Carrasco, J. Millán, L. Peña, EULA. (no se tiene dato de fecha de realización)

El estudio hace un compendio de la caracterización de los suelos existentes en la cuenca, presentando la información existente para la zona llamada “área reconocida”, y generando información preliminar para la llamada “área no reconocida”. El área no reconocida se encuentra sobre la cota 600 y llega hasta el límite con Argentina. Para el área conocida, hay tres estudios anteriores, de los cuales se obtiene la información.

El estudio contiene planos de suelos a escala 1:50.000 y 1:250.000.

Este estudio se incorporó al análisis en su forma actual, que consiste en coberturas de suelos digitalizadas por CIREN con fines comerciales. El objetivo específico de la utilización de estas coberturas fue el de apoyar el intento de regionalización de los parámetros del SIMED.

2.3.4 Estudio de Suelos en el área del Proyecto Laja – Diguillín. Agrolog Chile para ONU - Comisión Nacional de Riego. Mayo 1987

El objetivo fue realizar un informe, por encargo de la FAO, que sirviera de apoyo a la preparación del proyecto de riego del canal Laja-Diguillín. El informe abarca el estudio de suelos del valle central entre los ríos Larqui por el norte e Itata por el sur y poniente, y una faja al sur del río Itata en el sector de Yungay. El trabajo fue inspeccionado por la Comisión Nacional de Riego.

El trabajo cubre una superficie de 124.155,6 ha. Incluye el estudio agrológico y los correspondientes mapas interpretativos de capacidad de uso, categorías de riego, clases de drenaje, aptitud frutal de los suelos, situación actual de erosión y unidades de manejo. Los mapas de la totalidad del estudio se presentan a escala 1:20.000.

El estudio se inicia con la caracterización de la zona, en cuanto a ubicación, límites, vías de comunicación, y luego clima, vegetación, fisiografía, materiales de suelo, hidrografía y agricultura con la ocupación de los suelos.

En cuanto al estudio y análisis de los suelos propiamente tal, se describe la obtención de la cartografía básica, a partir de las fotos aéreas de la FACH, el método de trabajo para los reconocimientos directos, y las unidades de clasificación utilizadas.

El estudio de suelos se realizó agrupando los distintos tipos de suelos asumiendo que éstos no están distribuidos al azar, sino que presentan asociaciones claramente definidas siguiendo una determinada secuencia. Esta secuencia es representada a través de perfiles transversales tipo que cortan el llano central de oriente a poniente, con referencia al kilometraje del eje vial norte-sur. Este kilometraje podría variar actualmente debido a los cambios en el trazado que se han introducido a este eje. Sobre estos perfiles se presentan las ubicaciones de las distintas series.

Los suelos y sus series son descritos a través de su formación y se clasifican de acuerdo al Sistema de Clasificación “Taxonomía de Suelos”.

Luego se presenta el estudio agrológico y las correspondientes clasificaciones interpretativas de capacidad de uso, categorías de riego, clases de drenaje, aptitud frutal, erosión actual de los suelos y unidad de manejo de los mismos, para las que se recomiendan cultivos y rotaciones.

El estudio incluye, además de las propiedades físico químicas de éstos, mediciones de infiltración en cada serie.

La utilidad de este estudio radica en conocer el detalle de las características del suelo. Estas características actualmente se encuentran digitalizadas por CIREN, y disponibles comercialmente. Ellas constituyen una base real sobre la cual se intentó, aunque sin resultados, una transposición de los parámetros SIMED relacionados con el suelo, desde las cuencas de calibración, hacia todas las demás cuencas.

2.3.5 Estudio de Suelos Proyecto Itata, Etapas 1 y 2. Consorcio Agrolog Chile – RyQ Ingeniería para Comisión Nacional de Riego. 1987-1988

El objetivo fue realizar el Estudio de Suelos del Proyecto Itata, etapas 1 y 2. La etapa 1 cubre una superficie de 199.698 há con los siguientes límites: norte, llano central entre los ríos Ñiquen y Cato por el sur, la precordillera de Los Andes por el oriente y la Cordillera de La Costa por el occidente; la etapa 2 cubre una superficie de 125.389 há con los siguientes límites: norte, llano central entre los ríos Ñuble y Cato, por el sur el río Larqui, la precordillera de Los Andes por el oriente y el río Itata por el occidente. Ambos incluyen el estudio agrológico y los correspondientes mapas interpretativos de capacidad de uso, categorías de riego, clases de drenaje, aptitud frutal, situación actual de la erosión y unidades de manejo. Los estudios de terrenos fueron realizados en escala 1:50.000 y 1:30.000 con leyendas detalladas respectivamente. Los mapas se presentan en escala 1:20.000 para ambas etapas, sin embargo a la fecha no se cuenta con ellos.

En los tomos I de ambas etapas, como antecedentes básicos para el estudio, se presentan: el medio ambiente geográfico y agrícola, en el cual se describen las vías de comunicación, el clima, la vegetación, orografía, geomorfología -con la descripción de cada una las unidades que se encuentran en la zona del estudio -, la geología, la hidrografía y la agricultura con la ocupación de los suelos.

El estudio de suelos se realizó agrupando los distintos tipos de suelos en el entendido que éstos no están distribuidos al azar, si no que presentan asociaciones claramente definidas siguiendo una determinada secuencia. Esta secuencia es representada a través de perfiles transversales tipo que cortan el llano central de oriente a poniente, con referencia al kilometraje del eje vial norte-sur. Este kilometraje podría variar actualmente debido a los cambios en el trazado que se han introducido a este eje. Sobre estos perfiles se presentan las ubicaciones de las distintas series.

Los suelos y sus series son descritos a través de su formación y se clasifican de acuerdo al Sistema de Clasificación “Taxonomía de Suelos”.

Luego se presenta el estudio agrológico y las correspondientes clasificaciones interpretativas de capacidad de uso, categorías de riego, clases de drenaje, aptitud frutal, erosión actual de los suelos y unidad de manejo de los mismos.

En los tomos II de ambas etapas se presentan 28 y 27 series en las etapas 1 y 2 respectivamente, existiendo algunas comunes en ambos estudios. También se presenta un anexo con los símbolos y leyendas, claves para interpretar desde el punto de vista de la profundidad del suelo, su textura, pedregosidad, pendiente, erosión, drenaje, clase de profundidad y duración del estado mojado, inundaciones, salinidad y sodicidad, clases de capacidad de uso, categorías de suelo para regadío, clases de drenaje, clases de aptitud frutal y unidades de manejo.

Las series cuentan con propiedades físico-químicas del suelo e infiltrometría con tiempo acumulado de infiltración, velocidad de infiltración promedio e infiltración acumulada.

Una vez calibrado el modelo SIMED, esta información se usó como base real, entre otras que se pudieron establecer en el curso del estudio, sobre la cual intentar la transposición de los parámetros de calibración desde las subcuencas estudiadas hacia las demás cuencas del área de estudio.

2.3.6 Estudio de Suelos Complementario VIII Región. 2 Tomos. Agrolog Chile para CIREN. 1988

El objetivo del estudio fue completar los estudios agrológicos que a la fecha se habían desarrollado en la provincia de Ñuble, abarcando en esa oportunidad los suelos del llano central entre los ríos Itata y Laja, y cubriendo un área de 240.000 ha. Los límites específicos son por el norte, el río Diguillin, por el sur el río Laja, la precordillera de Los Andes por el oriente y la Cordillera de La Costa por el occidente.

Este estudio incluye el estudio agrológico y las correspondientes clasificaciones interpretativas de capacidad de uso, categorías de riego, clases de drenaje, aptitud frutal, erosión actual de los suelos y unidad de manejo de los mismos. El estudio se desarrolló con apoyo terrestre en 70.000 há en una escala de 1:50.000, dando origen a una leyenda detallada; el resto de tipo generalizado se desarrolló sobre una escala 1:100.000 dando origen a una leyenda semi-detallada. Todo el estudio se presenta en una escala 1:20.000.

Los tópicos abordados en el estudio, como antecedentes básicos, son el medio ambiente geográfico y agrícola, en el cual se describen las vías de comunicación, el clima, la vegetación, orografía, geomorfología - con la descripción de cada una las unidades que se encuentran en la zona de ese estudio -, la geología, la hidrografía y la agricultura -con la ocupación de los suelos.

Luego se incluyen 18 series descriptivas como unidades de clasificación, y otras unidades fuera de estas series que forman la totalidad el área de estudio. También se presenta un anexo con los símbolos y leyendas, claves para interpretar desde el punto de vista de la profundidad del suelo, su textura, pedregosidad, pendiente, erosión, drenaje, clase de profundidad y duración del estado mojado, inundaciones, salinidad y sodicidad, clases de

capacidad de uso, categorías de suelo para riego, clases de drenaje, clases de aptitud frutal y unidades de manejo.

Las series cuentan con propiedades físicas, químicas y físico-químicas del suelo.

Una vez calibrado el modelo SIMED, esta información se usó como base real, entre otras que se pudieron establecer en el curso del estudio, sobre la cual intentar la transposición de los parámetros de calibración desde las subcuencas estudiadas hacia las demás cuencas del área de estudio.

2.4 REVISIÓN DE ANTECEDENTES SOBRE EVAPORACIÓN HORARIA

2.4.1 Simulación de la evaporación horaria a partir de datos meteorológicos. V. Martínez Álvarez, J-M- Molina Martínez, M.M. González Real y A. Baille. Departamento de Ingeniería de Alimentos y de Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, España. Diciembre 2004

El principal objetivo de este estudio fue el de desarrollar y validar modelos de evaporación en tanques de evaporación Clase A, a nivel horario, con el fin de apoyar el conocimiento para la gestión adecuada de los recursos hídricos en zonas donde ellos son escasos. El estudio se incorpora completo, en el Anexo 2.4 Evaporación Horaria.

El estudio consistió en la medición de diversas variables hidrometeorológicas en la estación meteorológica universitaria, y en un tanque Clase A experimental, y esto en un día de cada estación del año: primavera, verano, otoño e invierno. Las variables controladas fueron: temperatura de fondo y de superficie del agua en el tanque, temperatura del aire y humedad relativa a 0,15 m y a 2,0 m sobre la superficie del tanque, radiación solar global incidente y reflejada, radiación neta, y velocidad del viento a 0,15 m y a 2,0 m sobre la superficie del tanque.

Inicialmente se modeló el tanque como un sistema hídrico multicapa, pero luego se determinó que las temperaturas de superficie y de fondo eran prácticamente la misma, con lo que se simplificó la modelación considerándose sólo una capa.

La tasa de evaporación del tanque se obtiene por medio de una ecuación empírica del tipo Dalton, que es la siguiente.

$$E = 0,095 * u_{200} + 0,0858 * (e_s - e_{200})$$

donde

E = evaporación horaria desde el tanque

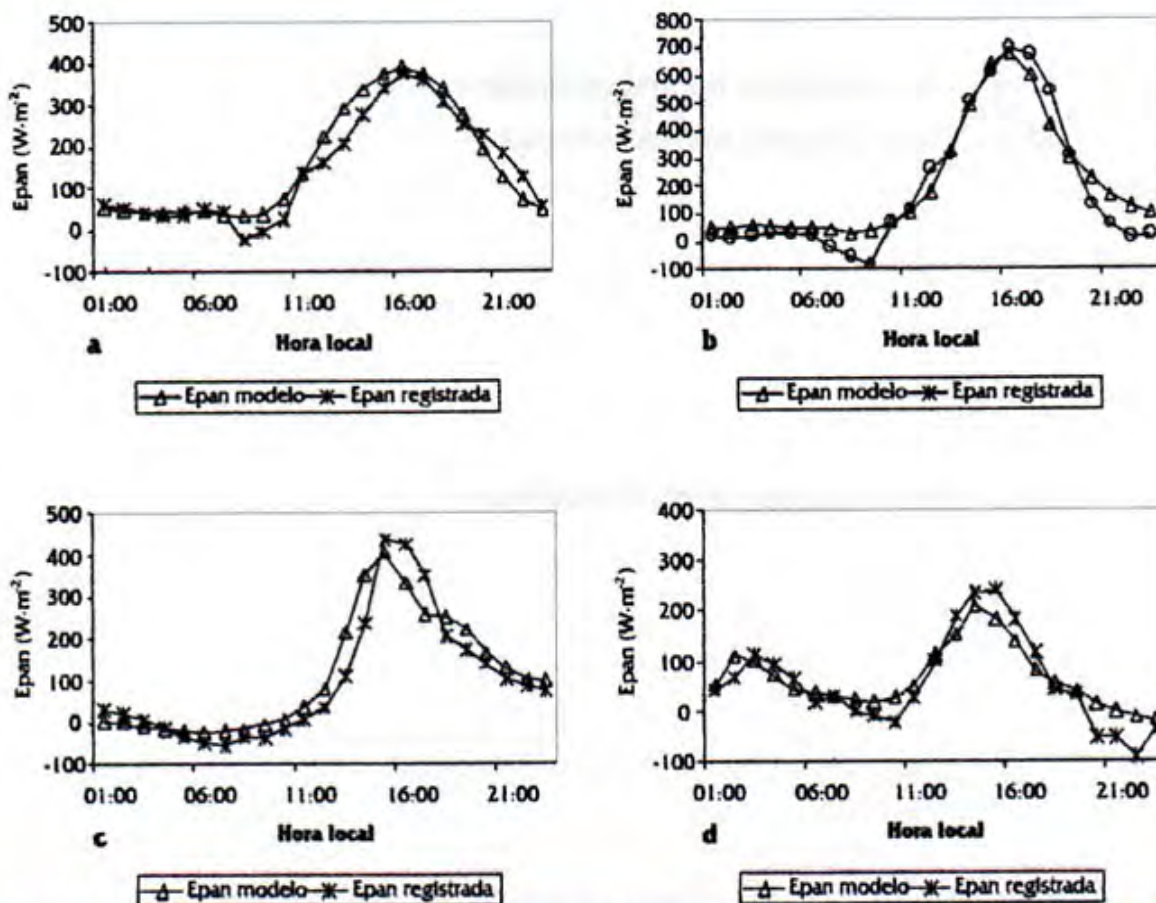
e_s = presión de vapor saturante a la temperatura superficial del agua en el tanque

e_{200} = presión de vapor del aire a 2,0 m sobre la superficie de agua en el tanque

u_{200} = velocidad del viento a 2,0 m sobre la superficie de agua en el tanque

Con esta fórmula, se obtuvieron datos que permitieron simular muy bien la evaporación en los días representativos de cada estación, como se aprecia en la Figura N° 2.

Figura N° 2
Simulación de la evaporación horaria. Valores medidos y simulados



- a) 1 de mayo de 2003
- b) 4 de agosto de 2002
- c) 17 de octubre de 2002
- d) 7 de enero de 2003

Aunque no se presenta como resultado de la publicación los valores de la evaporación medidos y simulados, de esta información se puede obtener nuevos factores para la evaporación horaria, para cada una de las cuatro estaciones del año.

2.4.2 Estudio de la reducción de la evaporación mediante un método químico. S. Miranda y M.T. Leal, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Anuario IMTA 2003

El estudio fue desarrollado con el objetivo de probar un nuevo producto químico biodegradable, el WaterSavr, que de acuerdo con su fabricante, aplicado como monocalca, ahorraría un 40% del agua en tanques pequeños, al evitar la evaporación.

Las mediciones de la evaporación se realizaron en un tanque evaporímetro Clase A, y en un tanque pequeño, Las Escobas, en México. Primero se realizaron mediciones de evaporación horaria por dos semanas sin el producto, y luego por otras dos semanas aplicando el producto. Los resultados de las mediciones, tanto en el tanque como en el embalse, se presentan en las Figuras siguientes. En la Figura N° 3a se observa que el ahorro de evaporación a nivel diario en el tanque evaporimétrico, que llega como máximo al 9%. En el embalse usado como caso real, el ahorro llega sólo al 4,1%. En la Figura N° 3b se presenta la evaporación horaria en el tanque con y sin producto. Se observa que el efecto de la aplicación del producto es poco perceptible.

Un resultado interesante del estudio fue la relación encontrada entre la evaporación desde el embalse real y el tanque tipo A. Esta relación fue de 0.59, y no de 0.7 o 0.75, como suele adoptarse en los estudios de balance. Esto se aprecia en la Figura N° 4.

Figura N° 3a
Evaporación de tanque diaria sin y con el producto químico

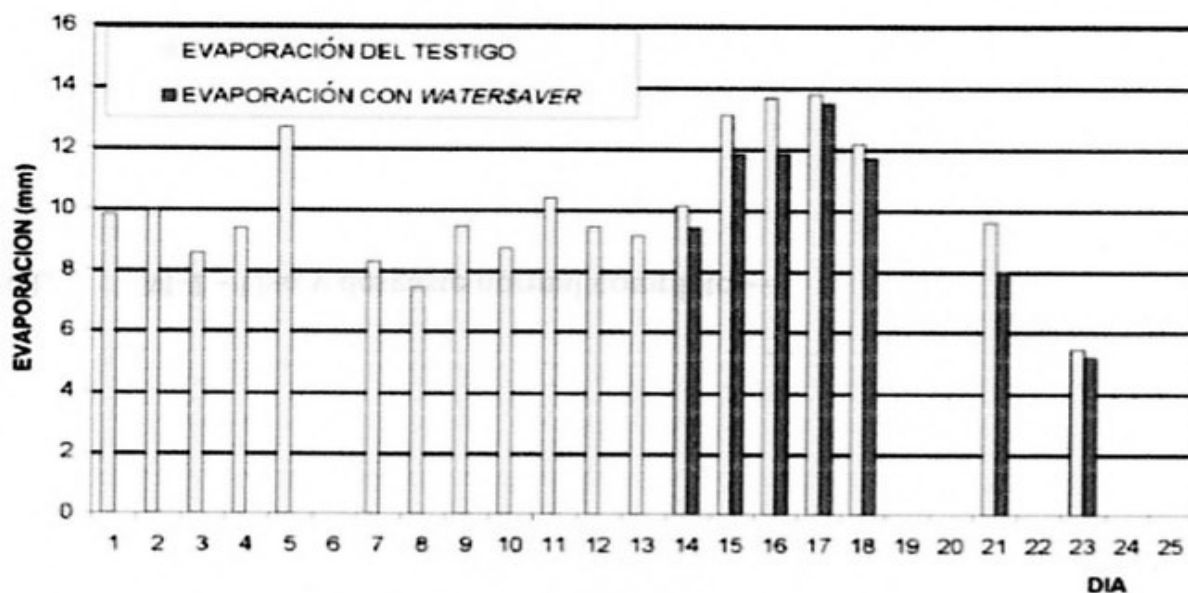


Figura N° 3b
Evaporación de tanque horaria sin y con el producto

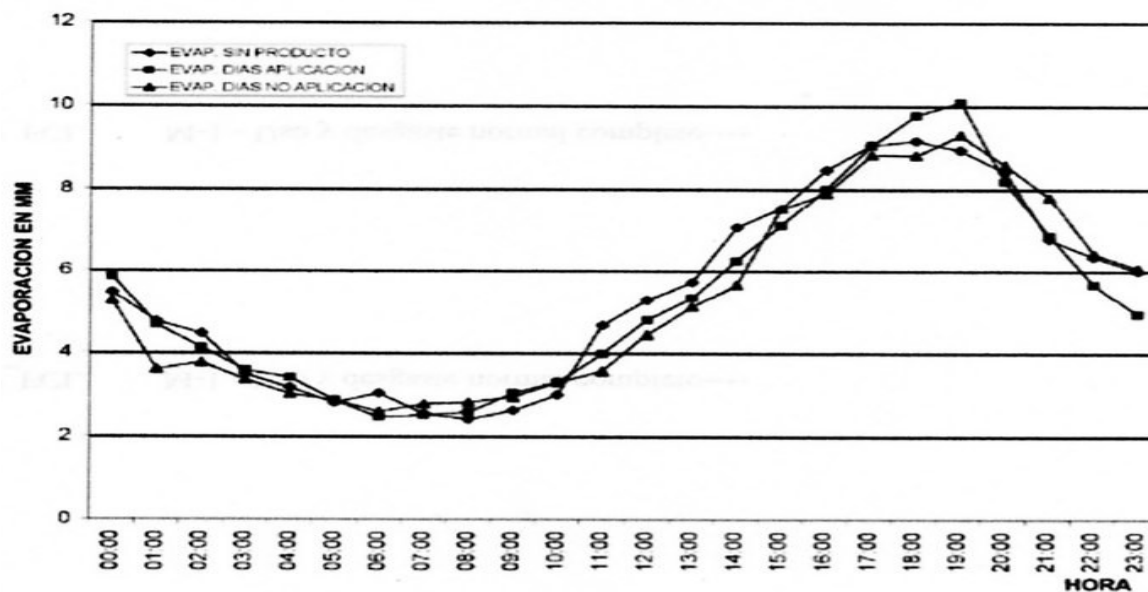
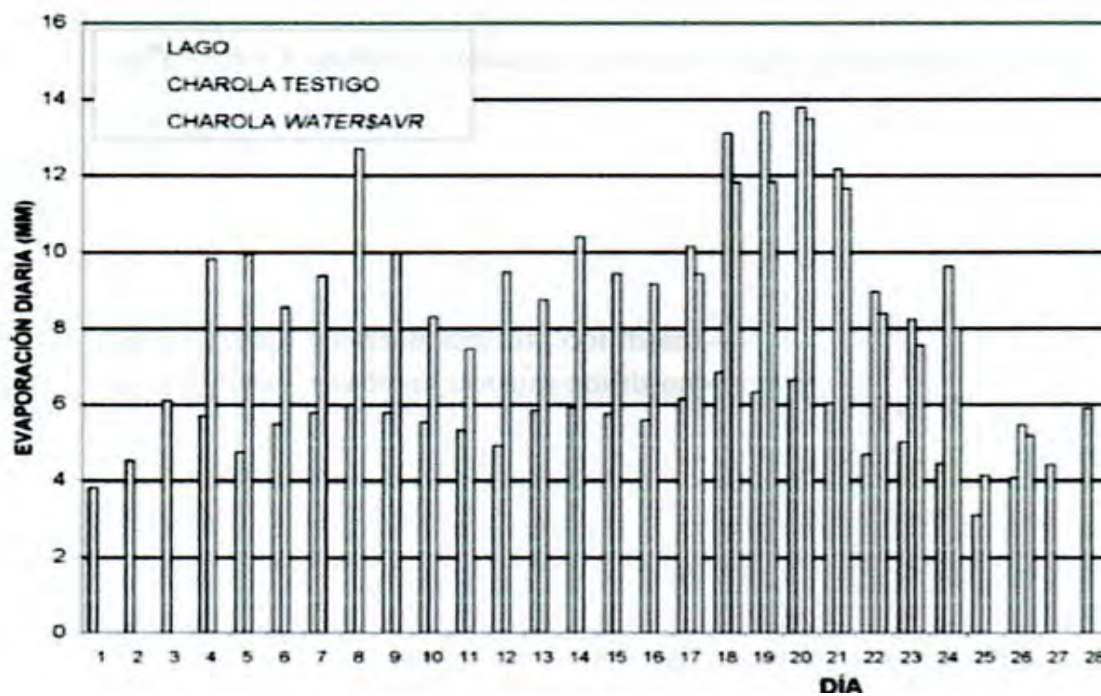


Figura N° 4
Comparación de la evaporación diaria en tanque A y en embalse



Este estudio también aportó información que permitió revisar y replantear los coeficientes de distribución horaria del modelo Sacramento, que son usuales en Chile hasta el día de hoy.

2.5 ANTECEDENTES EN SIG

2.5.1 Mosaico satelital Landsat de la zona de estudio, con resolución de 15 m.

Se obtuvo las imágenes satelitales Landsat de la zona de estudio, regiones VII, VIII y IX, con resolución de 15 m, y se configuró con ellas el mosaico correspondiente. Este mosaico se adaptó al sistema de referencia llamado WGS84 huso 19, debido a que el SIIR-CNR tiene este sistema.

El mosaico se utilizó de referencia para para todos los aspectos espaciales del trabajo. La resolución permite identificar la ubicación y extensión de todas las áreas cultivadas, ciudades y sistemas hidrográficos de importancia.

El mosaico se incorpora como una cobertura al SIG definitivo, el cual se entrega en medios magnéticos.

2.5.2 SIIR-CNR

La Comisión Nacional de Riego puso a disposición de la Dirección General de Aguas, para el presente trabajo, su Sistema de Información Geográfico correspondiente a las Regiones VII, VIII y IX, llamado SIIR. Este SIG aporta en especial las coberturas gráficas, porque las bases de datos lamentablemente no contienen información de utilidad. Aquí se reseña la información puesta a disposición del presente estudio.

Curvas de nivel

Esta cobertura tiene indicación de cotas en su base de datos.

Agroclima

Contiene información sobre código del distrito agroclimático y área en su base de datos. No contiene ninguna información climática.

Canales

Es una cobertura en que aparecen los canales, sin nombre ni datos que permitan identificarlos.

Embalses grandes (mayores que 50.000 m³)

La cobertura de embalses trae la ubicación de los embalses, pero no aporta identificación ni datos de ningún tipo en su base de datos..

Embalses pequeños (menores que 50.000 m3)

Al igual que la cobertura de embalses grandes, contiene la ubicación física de los embalses, pero no trae ninguna información que permita identificarlos.

Bocatomas

Se presenta la ubicación de la bocatoma y solamente un código asociado en su base de datos.

Ley 18450

Esta cobertura aporta en su base de datos el código del proyecto.

2.5.3 SIG de la Dirección General de Aguas

A su vez, la Dirección General de Aguas también puso a disposición de este trabajo la información que contiene su Sistema de Información Geográfico. Estas coberturas son muy completas, pues traen en su base de datos mucha información de nombres, además de información técnica de diversa naturaleza. Se señalan a continuación, con sus respectivas fuentes, las coberturas que serán incorporadas al SIG definitivo de este estudio. Todas se manejan en Dátum PSAD 56 Huso 19.

Fuente IGM

Se encuentran digitalizadas las coberturas de caminos, ciudades, regiones, comunas y curvas de nivel, en base a la cartografía 1:250.000 del IGM, y por lo tanto aparecen con el detalle de esa escala.

Estaciones DGA

Se encuentran las coberturas con la ubicación de todas las estaciones fluviométricas, pluviométricas, evaporimétricas, meteorológicas, de calidad de aguas y de medición de niveles subterráneos, con indicación acerca de su vigencia. Estas coberturas sirvieron para identificar las estaciones de las cuales se solicitó la información estadística para alimentar el modelo de simulación.

Catastro de Bocatomas

Existe un catastro de bocatomas para parte de la VIII Región correspondiente a las cuencas del río Itata y la ribera norte del río Bío-Bío, que permitió definir la ubicación y características de las bocatomas en cauces naturales de ese sector.

Balance hídrico

Estas coberturas se refieren a todas las variables hídricas estudiadas y analizadas en el estudio del Balance Hídrico de la DGA. Hay isolíneas de precipitaciones máximas, precipitaciones medias anuales, temperatura media anual, evaporación y evapotranspiración media anual y escorrentía anual.

Hidrogeología

Estas coberturas son todas las desarrolladas en el Mapa Hidrogeológico Nacional. Además, se ha agregado una cobertura con los acuíferos restringidos o prohibidos a noviembre de 2005.

Estudio Maule

Se cuenta también con diversas coberturas correspondientes a los estudios de modelación con MAGIC que se han desarrollado para la cuenca del Maule. Interesan fundamentalmente las coberturas de nodos y subcuencas que se han definido para la modelación.

2.5.4 Antecedentes de suelos de CIREN

Se averiguó acerca de los antecedentes de suelos que posee CIREN, y se adquirieron varias coberturas, con el objetivo de usarlas en la extrapolación espacial de los parámetros de calibración.

Las coberturas adquiridas fueron:

- Textura
- Granulometría
- Profundidad
- Capacidad de uso
- Pendiente

La información entregada por CIREN contiene solamente la caracterización espacial según los rangos establecidos para cada característica, y la asociación con dicha característica en la base de datos.

Las coberturas adquiridas se entregan en el Anexo Digital 2.5 Coberturas de suelos CIREN.

CAPÍTULO 3**IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS
Y PERÍODOS DE CALIBRACIÓN**

Dada su concepción, el modelo SIMED representa el comportamiento natural de cuencas pluviales. Esto significa que simula el escurrimiento de una cuenca a partir de la precipitación, la evaporación y los parámetros propios de la cuenca, en las condiciones asumidas para modelar. Por esta razón, para calibrar el modelo, se requiere hacerlo en una cuenca cuyas condiciones puedan ser captadas y representadas por los parámetros de modelación.

Lo señalado significa que las cuencas de calibración deben, en lo posible, estar libres de intervenciones antrópicas (canales, trasvases, lagos, embalses u otros), que distorsionen el comportamiento del escurrimiento resultante.

Por otro lado, la calibración del modelo exige trabajar en cuencas con control meteorológico (pluviométrico o pluviográfico y evaporimétrico) y fluviométrico.

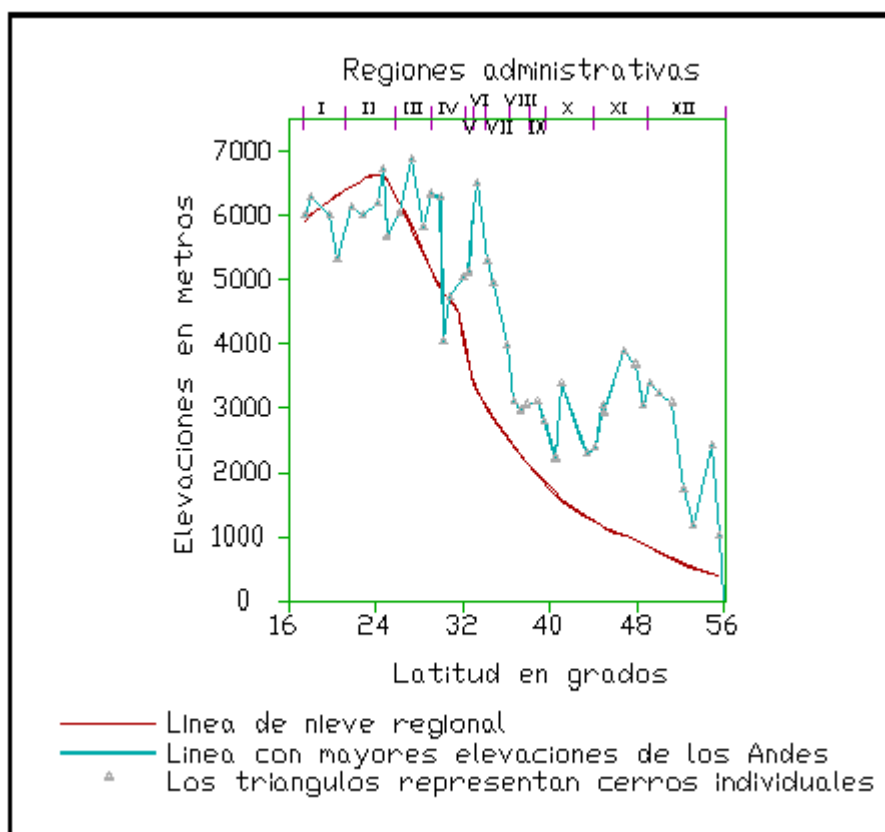
Por lo anteriormente señalado, es necesario entonces, identificar las cuencas pluviales, no intervenidas y con control fluviométrico, para poder proceder a la calibración del modelo. El control meteorológico es menos crítico, porque es arealmente más abundante.

**3.1 PRIMER DESCARTE DE ESTACIONES NIVALES O
ALTERADAS****a) Descarte de estaciones francamente nivales**

La identificación de cuencas pluviales se efectuó en varios pasos. Lo primero que se hizo, fue identificar la línea de nieve, para descartar todas las estaciones fluviométricas que controlan cuencas francamente nivales.

De acuerdo con un estudio realizado en 1995 por Gino Casassa, para el Laboratorio de Glaciología, proyecto conjunto de la Universidad de Chile y del Centro de Estudios Científicos de Valdivia, y temporalmente publicado en la página www.glaciologia.cl, la línea de nieve presenta la evolución de la Figura N° 5 a lo largo de las diferentes regiones de Chile:

Figura N° 5
Evolución de la línea de nieve a lo largo de Chile
(Casassa, 1995)



Según se puede observar, a medida que se avanza hacia el sur la línea de nieve varía entre las cotas 3000 y 2550 en la región VII, entre 2550 y 2050 en la región VIII y entre 2050 y 1850 en la región IX. Estas curvas de nivel se presentan marcadas en la Figura N° 6.

En la misma Figura N° 6 también se incluyen las estaciones fluviométricas de la DGA. Se comenzó el análisis a partir del universo completo de estaciones, tanto vigentes como suspendidas, de modo de no dejar fuera ninguna posibilidad de calibración.

En base a la ubicación de la línea de nieve, y a partir del total de estaciones de la DGA, se hizo un primer descarte de todas las estaciones francamente nivales, que representan cuencas con alrededor de un 70% o más de sus áreas sobre la línea de nieves.

b) Descarte de estaciones francamente alteradas

Por otro lado, se ubicó en SIG todas las obras como bocatomas de canales y embalses, que alteran el régimen hidrológico de los ríos. En base a la observación de la ubicación y características de capacidad de las bocatomas, se procedió también al descarte de las estaciones ubicadas aguas abajo de grandes bocatomas, o aguas abajo de gran cantidad de pequeñas bocatomas, por considerarse de régimen alterado. Las estaciones alteradas por embalses se mantuvieron en esta etapa, porque la fecha de inicio de operación de los embalses es conocida, y muchas veces posterior a las fechas de inicio de control fluviométrico, de modo que las estaciones hoy alteradas, pueden servir para períodos más antiguos.

La ubicación de las bocatomas y embalses se encuentra en la Figura N° 7, adjunta.

c) Resultado de la primera selección

El resultado de la primera selección se presenta en el Cuadro N° 5, donde se han excluido estaciones francamente nivales y francamente alteradas. Las 70 estaciones seleccionadas configuran una nueva cobertura de estaciones fluviométricas llamada fluvio1.shp.

Como se puede observar en la Figura N° 8, las estaciones seleccionadas se ubican preferentemente en zonas altas no cordilleranas y en cuencas costeras.

Figura N° 6
Cotas de la línea de nieve y estaciones fluviométricas DGA

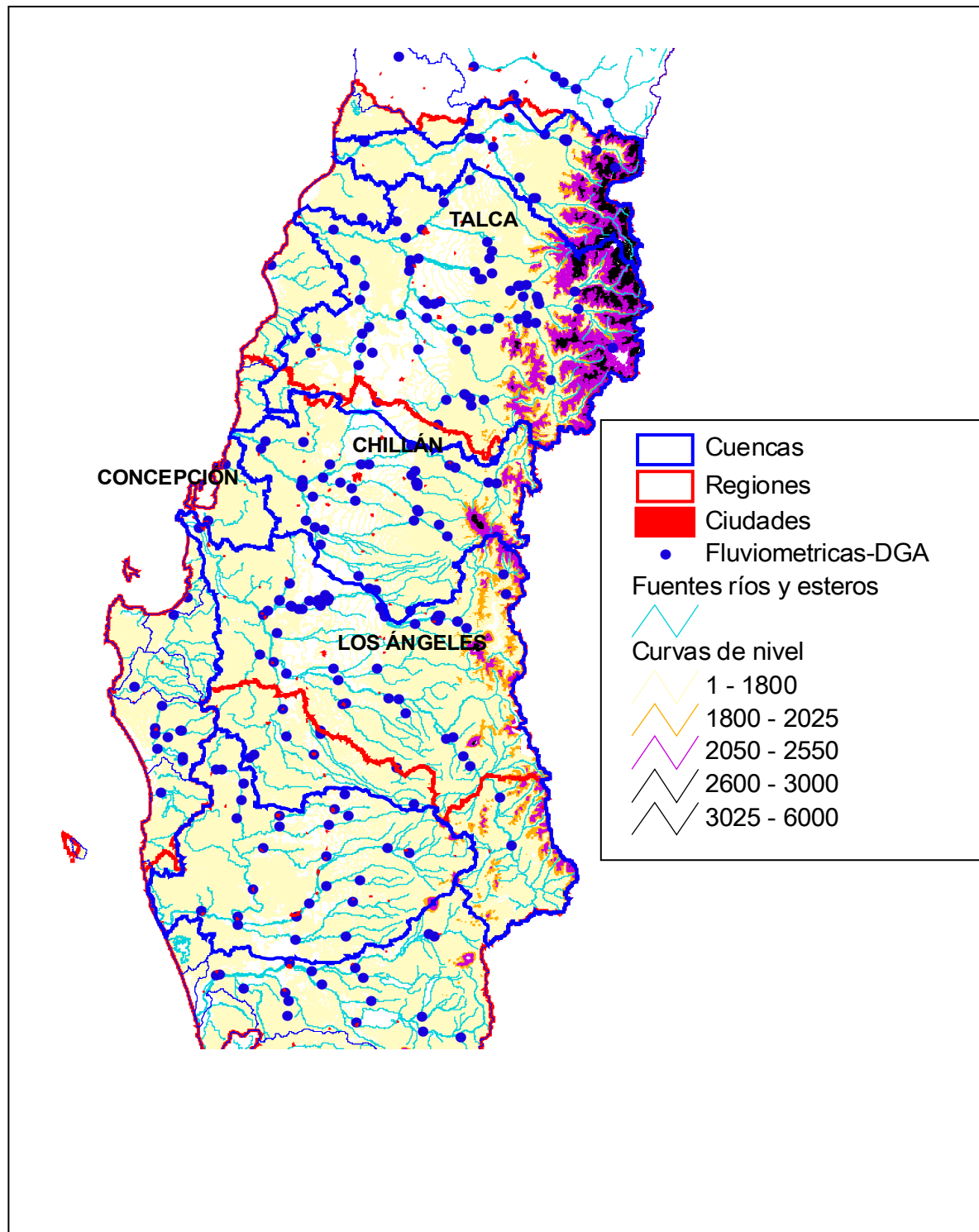
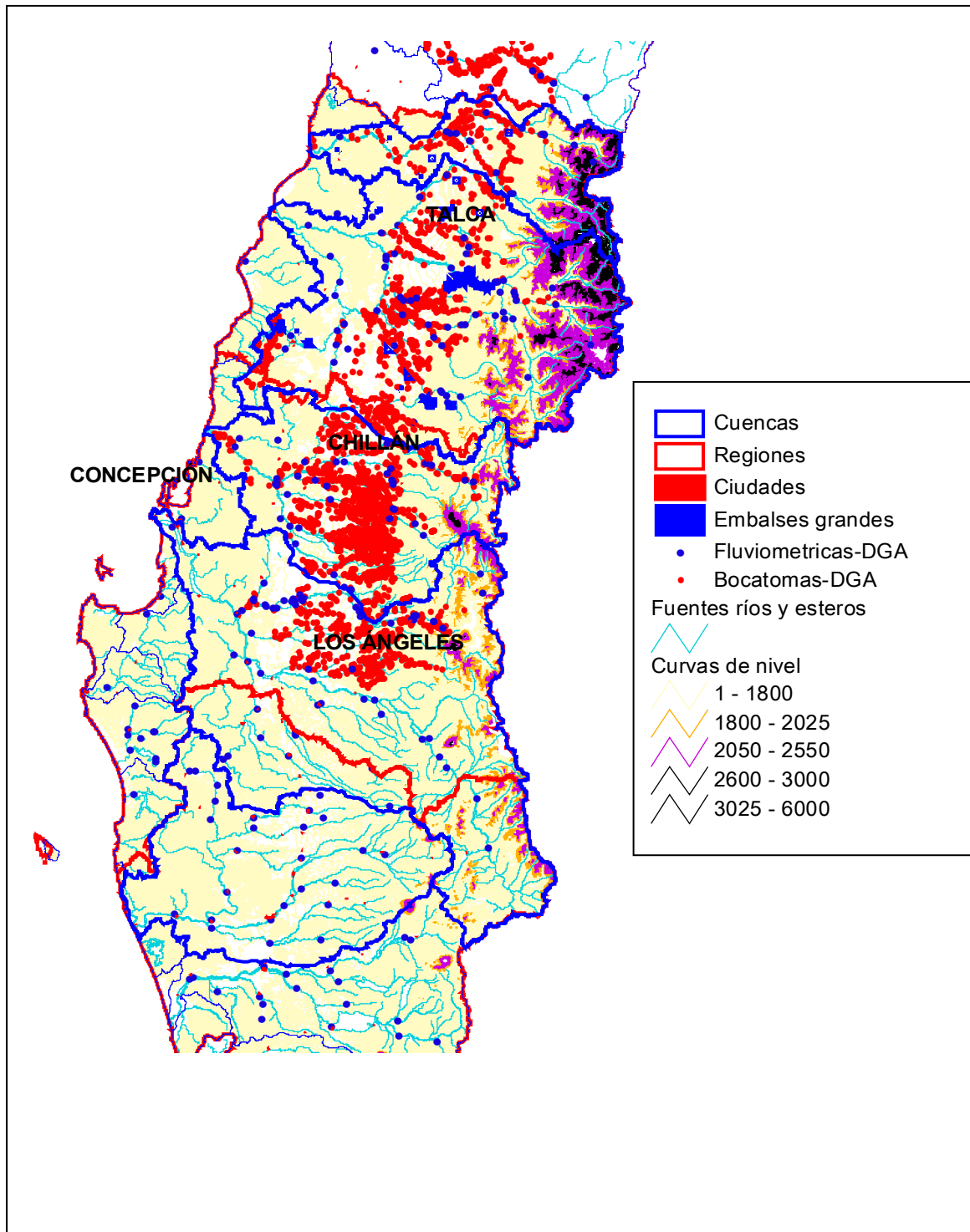


Figura N° 7
Ubicación de bocatomas y embalses en relación con las estaciones fluviométricas

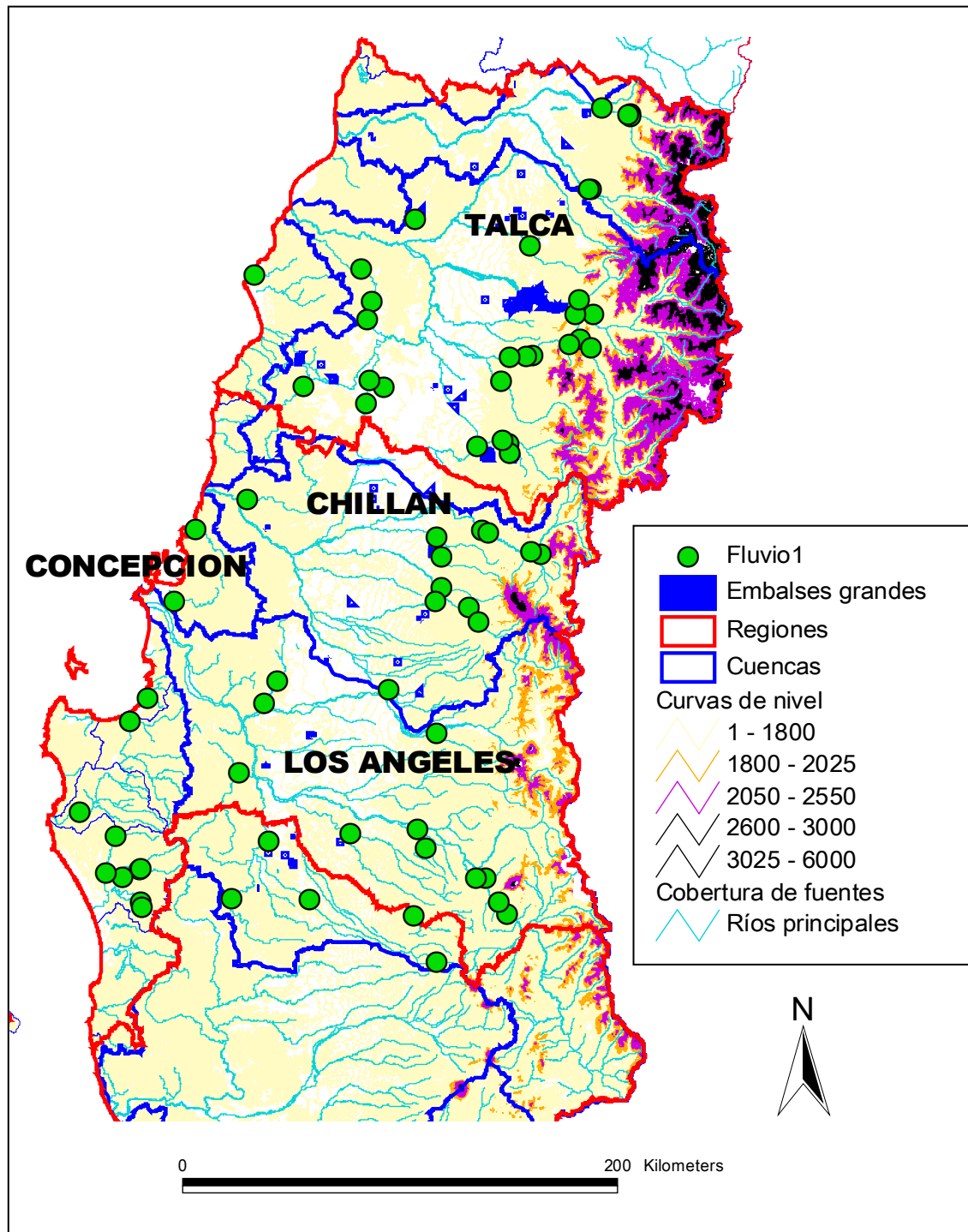


Cuadro N° 5
Listado de estaciones primera selección (fluvio1.shp)

Región	Cuenca	Estación
VII	Mataquito	Río Teno en Los Queñes
		Río Claro en Los Queñes
		Río Teno después Junta Claro
		Estero El Manzano antes Junta Río Teno
		Río Colorado en Junta con Palos
		Río Palos en Junta con Colorado
VII	Maule	Estero Los Puercos en puente Los Puercos
		Río Lircay en puente Las Rastras
		Estero Las Garzas
		Río Claro en San Carlos
		Río Melado en zona de presa
		Río Melado en el Salto
		Río Melado en la lancha DGA
		Río Ancoa antes túnel Canal Melado
		Río Ancoa en El Morro
		Río Ancoa en Las Minas
		Río Ancoa en Las Vegas
		Río Achibueno en La Recova
		Río Bullileo en portal túnel
		Río Bullileo en Santa Filomena
		Río Longaví antes Junta Bullileo
		Río Cato en Digua
		Estero Curipeumo en Lo Hernández
		Río Perquillauquén en Santa Ema
		Río Perquillauquén en Quella
		Río Cauquenes en El Arrayán
		Río Purapel en Nirivilo
		Río Purapel en Purapel
		Río Purapel en Sauzal
VII	Costeras	Río Loanco en desembocadura
VIII	Itata	Río Sauces antes junta Ñuble
		Río Ñuble en la Punilla
		Río Ñuble en San Fabián (suspendida y vigente)
		Río Cato antes junta con Ñuble
		Río Niblinto antes BT embalse
		Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)
		Río Diguillín en balsa Zapallar
		Río Renegado en Invernada
		Río Chillán en Esperanza y Esperanza N° 2
		Río Cholguán en Cholguán

		Río Lonquén en Trehuaco
Región	Cuenca	Estación
VIII	Bío Bío	Río Bío Bío en Angostura Ralco N° 1 Río Bío Bío antes junta Huri Huri Río Pangue en captación Río Bío Bío antes Junta Pangue Río Rucúe en camino a Antuco Estero Potrerada antes junta río Laja Río Lirquén en cerro El Padre Río Bío Bío en Rucalhue Río Bureo en Mulchén Río Rehue en Quebrada Culenes Río Nicodahue (Nicudahue) en Pichún Río Claro en camino Yumbel estación Río Claro en estación Río Claro
IX		Río Renaico en Jauja Río Malleco en la Laguna Río Malleco en Collipulli Río Vergara en Tijeral
VIII	Costeras	Río Pingueral en Dichato Río Andalién camino a Penco Río Laraquete en El Cajón Río Carampangue en Carampangue Río Lebu en Las Corrientes Estero Caramávida en Caramávida Estero Peleco en puente Ponotro Río Butamalal en Butamalal Río Cayucupil en Cayucupil Río Reputo en Reputo Río Elicura en Puente Elicura Estero Calebu en puente Calebu

Figura N° 8
Estaciones fluviométricas primera selección (fluvio1)



3.2 SEGUNDO DESCARTE DE ESTACIONES NIVALES, PLUVIONIVALES O ALTERADAS

Para todas las estaciones seleccionadas después del primer descarte, se procedió a un segundo descarte. Se graficaron los caudales medios mensuales, con el objetivo de realizar un análisis más concreto del tipo de escurrimiento (con las excepciones de Río Cato antes junta con Ñuble, Río Rehue en Quebrada Culenes, Estero Calebu en puente Calebu, Río Peleco en puente Ponotro y Estero Caramávida en Caramávida, no habidas en el BNA). Se identificaron, de esta forma, muchas estaciones adicionales con régimen nival, muchas con régimen pluvionival, algunas estaciones alteradas por canales, y los periodos alterados por la construcción de tranques o embalses en otras.

Los gráficos de caudales medios mensuales realizados y analizados para este fin, por su volumen, se presentan en medios magnéticos, en el Anexo Digital de este informe, en una carpeta llamada 3.2 Gráficos QMM. Las Figuras N° 9 y 10 adjuntas solamente se presentan aquí a modo de ejemplo de caudales alterados por régimen nival y por riego (embalse).

El resultado de esta segunda selección se presenta para todas las estaciones en el Cuadro N° 6, en que la observación muestra el motivo de descarte, y en la columna 2ª selección se identifican las 23 estaciones preseleccionadas.

Figura N° 9
Caudales medios mensuales alterados por régimen nival

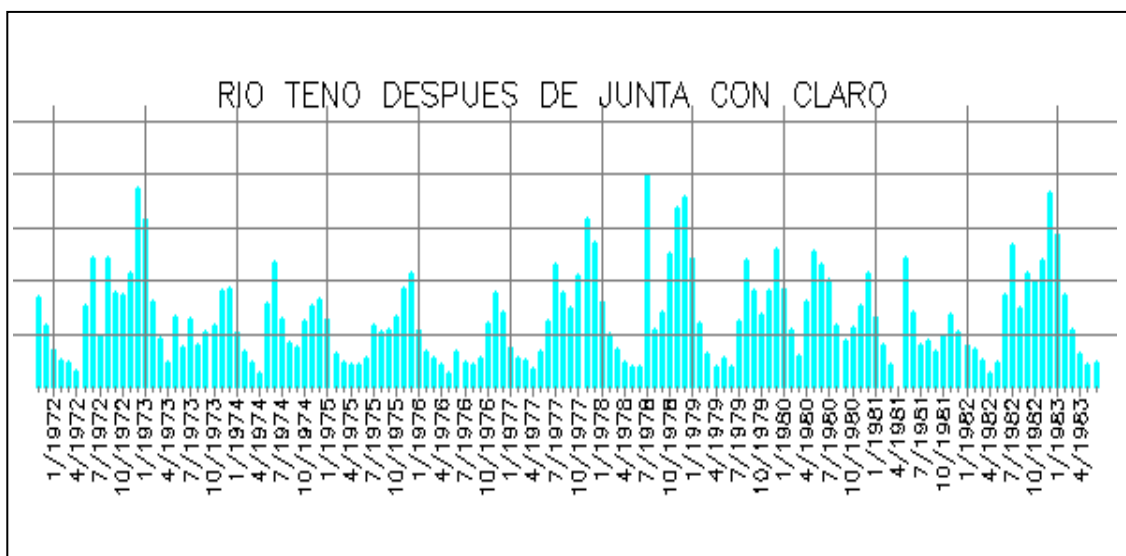
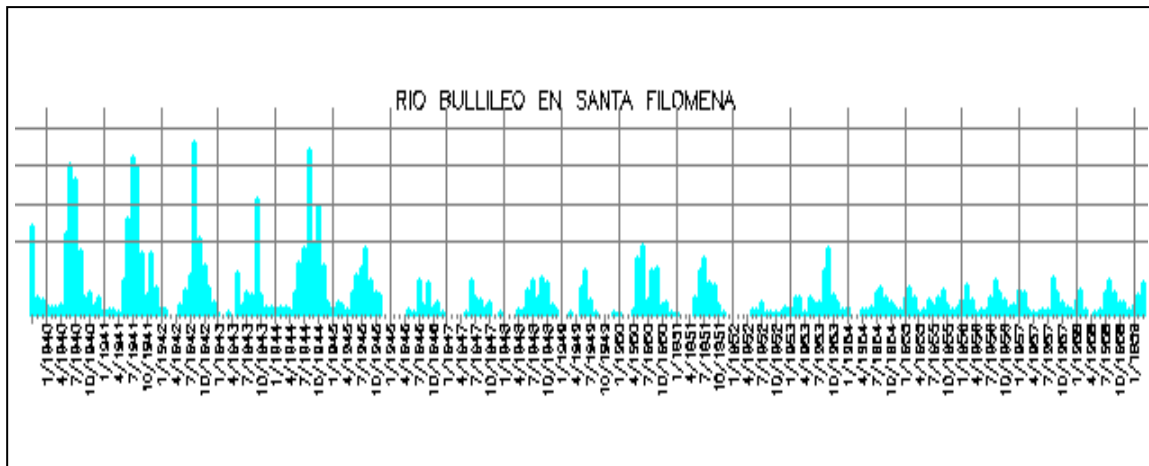


Figura N° 10
Caudales medios mensuales alterados por riego



3.3 TERCER DESCARTE: VISITA DE TERRENO

Con el objetivo de reconocer estaciones no aptas o alteradas, cuya calidad de tal no se hubiera identificado a través de la labor de gabinete, se realizó una visita a terreno de 6 días, entre el 10 y el 15 de marzo de 2008. En esta visita se conversó con los jefes provinciales sobre las estaciones, y se logró visitar e inspeccionar 20 de las 23 estaciones preseleccionadas, para saber si seguían aptas para ser usadas en la calibración.

Un breve informe de las estaciones y embalses visitados, incluyendo fotografías, se presenta en el Anexo Digital 3.3.

De las estaciones visitadas, se encontró dos que claramente presentan alteraciones, que se muestran en las Fotos N° 1 y 2, y que fueron:

- Estero Los Puercos en Puente Los Puercos, donde en crecida el estero se divide en tres brazos, de los cuales la estación sólo mide uno
- Loanco en desembocadura, donde hay un muro que embalsa el río antes de su desembocadura, para aislarlo de las mareas, y no permite el escurrimiento, justamente en la sección donde está emplazada la sección de aforo.

En la última columna del Cuadro N° 6 se señalan estas dos estaciones, que quedan fuera en la tercera selección. La cobertura que contiene las estaciones restantes después de la tercera selección se llama fluvio2.shp, contiene 21 estaciones y se muestra en la Figura N° 11.

Foto N° 1
Estero Los Puercos en Puente Los Puercos
Brazo no controlado



Foto N° 2
Río Loanco en Desembocadura
Barrera continua

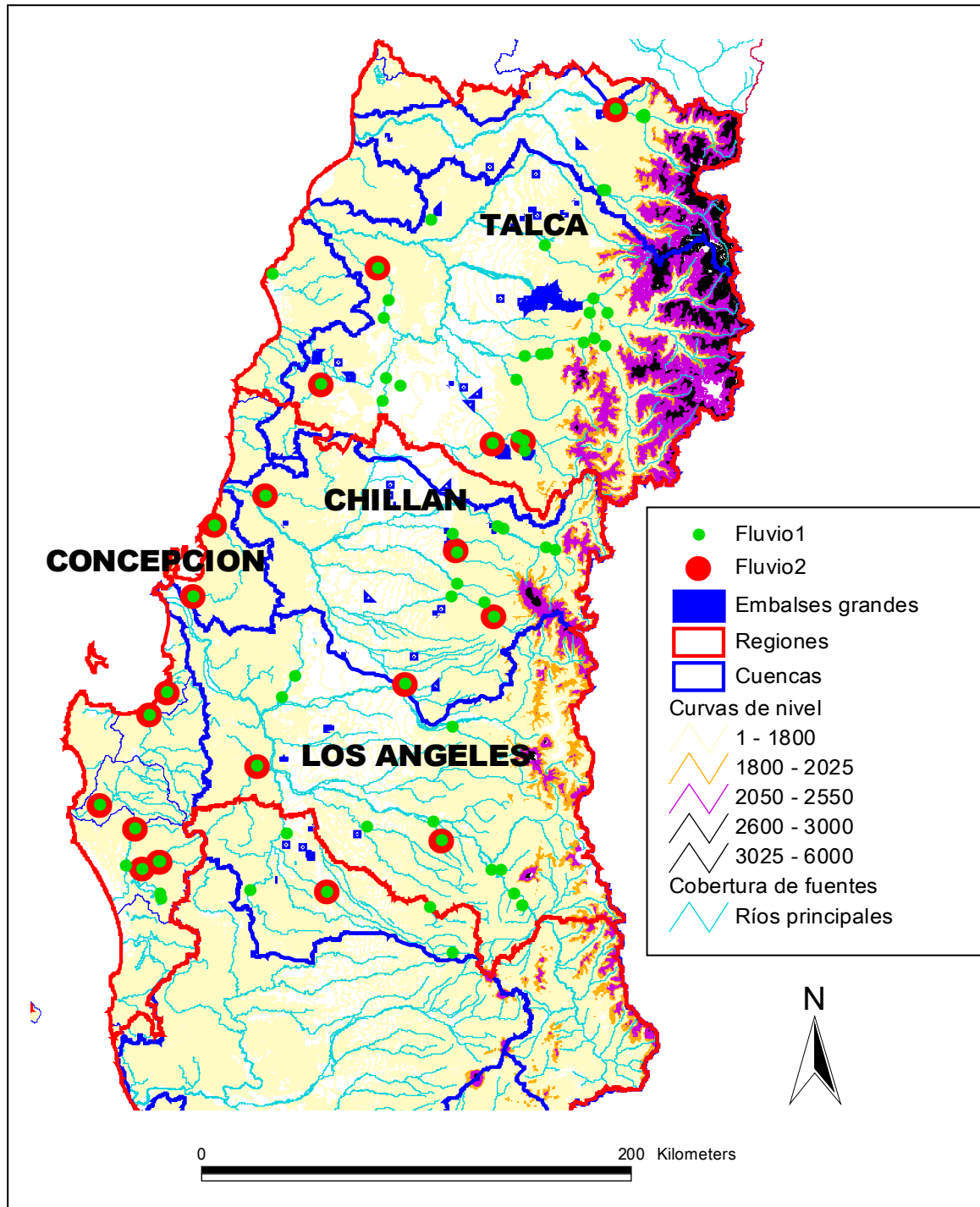


Cuadro N° 6
Listado de estaciones segunda y tercera selección (fluvio2.shp)

Región	Cuenca	Estación	Obs QMM	2ª selec.	3ª selec.
VII	Mataquito	Río Teno en Los Queñes	nival		
		Río Claro en Los Queñes	nival		
		Río Teno después Junta Claro	nival		
		Estero El Manzano antes Junta Río Teno		sí	si
		Río Colorado en Junta con Palos	nival		
		Río Palos en Junta con Colorado	nival		
VII	Maule	Estero Los Puercos en puente Los Puercos		sí	NO
		Río Lircay en puente Las Rastras	alterada		
		Estero Las Garzas	mixta		
		Río Claro en San Carlos	mixta		
		Río Melado en zona de presa	alterada		
		Río Melado en el Salto	nival		
		Río Melado en la lancha DGA	nival		
		Río Ancoa antes túnel Canal Melado	mixta		
		Río Ancoa en El Morro	mixta, alt desde 1969		
		Río Ancoa en Las Minas	mixta		
		Río Ancoa en Las Vegas	alterada		
		Río Achibueno en La Recova	mixta		
		Río Bullileo en portal túnel		no apta para cal. sí antes emb	
		Río Bullileo en Santa Filomena			sí
		Río Longaví antes Junta Bullileo	mixta		
		Río Cato en Digua		sí	sí
		Estero Curipeumo en Lo Hernández	alterada		
		Río Perquillauquén en Santa Ema	alterada		
		Río Perquillauquén en Quella	alterada		
		Río Cauquenes en El Arrayán		sí	sí
		Río Purapel en Nirivilo		sí	sí
VII	Costeras	Río Loanco en desembocadura		sí	NO
VIII	Itata	Río Sauces antes junta Ñuble	nival		
		Río Ñuble en la Punilla	nival		
		Río Ñuble en San Fabián (susp. y vigente)	nival		
		Río Cato antes junta con Ñuble	no habida en BNA		
		Río Niblinto antes BT embalse		sí	sí
		Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco)		sí	sí

Región	Cuenca	Estación	Obs QMM	2ª Selecc	3ª Selecc
VIII	Bío Bío	Río Diguillín en balsa Zapallar	mixta		
		Río Renegado en Invernada	mixta		
		Río Chillán en Esperanza y Esperanza N° 2	mixta, pocos datos		
		Río Cholguán en Cholguán	muy antigua	sí	sí
		Río Lonquén en Trehuaco		sí	sí
		Río Bío Bío en Angostura Ralco N° 1	muy pocos datos		
		Río Bío Bío antes junta Huri Huri	mixta		
		Río Pangue en captación	pocos datos		
		Río Bío Bío antes Junta Pangue	mixta		
		Río Rucúe en camino a Antuco	alterada por canal		
		Estero Potrerada antes junta río Laja	pocos datos		
		Río Lirquén en cerro El Padre		sí	sí
		Río Bío Bío en Rucalhue	nival		
		Río Bureo en Mulchén	alterada no habida en BNA		
		Río Rehue en Quebrada Culenes			
		Río Nicodahue (Nicudahue) en Pichún		sí	sí
		Río Claro en camino Yumbel estación	alterada		
IX		Río Claro en estación Río Claro	pocos datos		
		Río Renaico en Jauja	pocos datos		
		Río Malleco en la Laguna	mixta		
		Río Malleco en Collipulli		sí	sí
		Río Vergara en Tijeral	alterada		
VIII	Costeras	Río Pingueral en Dichato		sí	sí
		Río Andalién camino a Penco		sí	sí
		Río Laraquete en El Cajón		sí	sí
		Río Carampangue en Carampangue		sí	sí
		Río Lebu en Las Corrientes		sí	sí
		Estero Caramávida en Caramávida		sí	sí
		Estero Peleco en puente Ponotro	no habida en BNA		
		Río Butamalal en Butamalal		sí	sí
		Río Cayucupil en Cayucupil		sí	sí
		Río Reputo en Reputo		sí	sí
		Río Elicura en Puente Elicura	alterada por lago		
		Estero Calebu en puente Calebu	no habida en BNA		

Figura N° 11
Resultado tercera selección estaciones fluviométricas para calibración
(fluvio2.shp)



3.4 ASOCIACIÓN CON ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Para que una estación fluviométrica siga en la lista de las aptas para calibración, deben cumplir algunas condiciones las estaciones pluviométricas (o pluviográficas), y evaporimétricas cercanas o representativas, que se usarán para la calibración. Las condiciones que dichas estaciones deben cumplir, son las siguientes:

- deben tener registros simultáneos, para generar la información de entrada al modelo.
- los valores de precipitación deben explicar el comportamiento de los caudales.

a) Observación de períodos concurrentes de precipitaciones para calibración

Primero se procedió a asociar, a cada una de las estaciones fluviométricas seleccionadas después del tercer descarte, todas las estaciones pluviométricas (o pluviográficas) cercanas. Para las 21 estaciones fluviométricas aptas, el conjunto de todas las estaciones pluviométricas cercanas configura una cobertura llamada pluvio1.shp, y contiene 55 estaciones.

Se hizo el análisis de la concurrencia en el tiempo de la estadística diaria. Este análisis se presenta en el Anexo Digital en la carpeta llamada 3.4 Gráficos Q-P, y en el Cuadro N° 7 adjunto.

Este análisis mostró lo siguiente:

- La estación río Cholguán en Cholguán es muy antigua y no tiene períodos concurrentes de estaciones pluviométricas/pluviográficas cercanas.

A partir de estas consideraciones, quedan 20 estaciones fluviométricas aptas para calibración.

b) Definición de estaciones pluviométricas / pluviográficas y períodos para calibración

El análisis gráfico de las estadísticas diarias de caudal y precipitaciones a partir de los gráficos Q-P permitió seleccionar la o las estaciones pluviométricas o pluviográficas más explicativas del régimen de caudales en cada caso, y se identificaron los períodos aptos para calibración (y validación). Se dejaron fuera períodos con estadísticas interrumpidas de precipitaciones, y períodos con alteraciones visibles de caudales.

En el mismo Cuadro N° 7 se identifica, como resultado del análisis, para cada una de las 20 estaciones fluviométricas que siguen pareciendo aptas, la estación meteorológica más explicativa, y el período de calibración (o validación) seleccionado.

Cuadro N° 7
Determinación de estaciones fluvio y pluviométricas y períodos de calibración/validación

Estación Fluviométrica	Período Estad. Fluviom.	Estaciones Meteo asociada	Período Estad. Pluviom	Período apto calib. o valid.
Estero El Manzano	Ene 60-Oct 84	Río Teno junta Claro El Manzano Santa Susana La Rufina Tinguiririca bajo Briones	Ago 99-Dic 2006 Jul 59-Oct 67 y Abr 76-Dic 03 Ene 81-Dic 06 May 29-Dic 07 Ene 99-Dic 07	Ene 60-Dic 83
Río Bullileo en Santa Filomena	Dic 26-Dic 84 alt.emb.Digua	Longaví en La Quiriquina Digua Embalse La Sexta de Longaví Juan Amigo Bullileo Embalse	Abr 01-Dic 06 Ene 47-Dic 97 Jun 92-Dic 06 Jun 92-Dic 06 May 30-Dic 06	Feb 31-Mar 45
Río Cato en Digua	Ene 52-Dic 67 Ene 68- alt. Emb.Digua	Digua Embalse Longaví en la Quiriquina San Manuel en Perquilauquén	Oct 47-Dic 97 Abr 01-Dic 06 Jun 56-Dic 06	Nov 53-Jul 55 y Feb 59-Dic 67
Río Cauquenes en El Arrayán	Mar 45-Dic 06	Tutuvén Embalse El Alamo Mangarral Quella La Estrella	May 75-Dic 06 Ene 94-Dic 06 Mar 92-Dic 06 Ago 61-Dic 05 Jun 92-Dic 06	Ene 77-Dic 06 Ene 62-Dic 74
Estación Fluviométrica	Período Estad. Fluviom.	Estaciones Pluvio asociada	Período Estad. Pluvio	Período apto calib. o valid.

Estero Purapel en Niriivilo	May 57-Nov 03	Niriivilo La Estrella Maule en Forel Constitución Loncomilla en Las Brisas Pencahue	Jun 61-Dic 06 Jun 92-Dic 06 May 01-Dic 06 Jul 92-Dic 06 May 01-Dic 06 Jul 76-Dic 06	Mar 66-Dic 71 y Mar 75-Dic 93 y May 00-Ene 04
Río Niblinto antes BT Embalse Coihueco	Sep 73-Abr 02	Bullileo Embalse Coihueco Embalse Ñuble en San Fabián San Fabián	May 30-Dic 06 Sep 71-Dic 00 Ago 01-Sep 07 Oct 56-Dic 00	Ene 74-Dic 98
Río Diguillín en San Lorenzo	May 46-Dic 06	Atacalco Fdo. San Lorenzo Fundo Las Trancas	Oct 30-Dic 06 Ene 61-Dic 91 Ene 62-Dic 06	May 46-Nov 59 y Abr 67-Dic 06
Río Cholguán en Cholguán	Jun 28-Ago 31	Las Cruces Cholguán Tucapel Río Laja en Tucapel	Ene 93-Dic 06 Sep 56-Dic 06 Feb 75-Oct 07 Jun 01-Sep 07	NO HAY PER. COMÚN, ES MUY ANTIGUA
Río Lonquén en Trehuaco	Oct 85-Jun06	San Agustín de Puñual Coelemu Rafael Mangarral	Ene 93-Dic 07 Abr 62-Nov 05 Ene 93-Dic 07 Mar 92-Dic 06	Feb 86-Feb 05
Río Lirquén en cerro El Padre	Dic 42-Dic 06	Cerro El Padre Quillaileo Poco a Poco	May 43-Dic 06 Sept 92-Dic 07 Ago 92-Dic 06	May 43-Dic 06
Estación Fluviométrica	Período Estad. Fluviom.	Estaciones Pluvio asociada	Período Estad. Pluvio	Período apto calib. o valid.

		Quilaco	Oct 48-Dic 06	
Río Nicodahue en Pichún	Abr 88-Ago 06	Los Angeles Laja Parque Nahuelbuta Angol	Jul 62-Dic 06 Ene 61-Dic 05 Nov 02-Nov-07 Ene 75-Nov 07	Abr 88-Feb 91 y Feb 95-Ago 06
Río Malleco en Collipulli	Abr 48-Dic06	Collipulli Ercilla Vida Nueva Encinar Malleco Laguna Malleco	Abr 62-Dic 06 May 98-Oct 07 Ago 88-Oct 07 Oct 55-Sep 07	Oct 55-Oct 72 y Mar 77-Ene 00
Río Pingueral en Dichato	Mar 85-Ene 89	Coelemu Rafael Cancha Los Litres Las Pataguas	Abr 62-Nov 05 Ene 93-Dic 07 Ene 93-Dic 06 Ene 93-Dic 06	Mar 85-Ene 89 ojo julio 88
Río Andalién en camino a Penco	Nov 60-Dic 06	Las Pataguas Cancha Los Litres Andalién Chillancito Concepción DGA	Ene 93-Dic 06 Ene 93-Dic 06 Nov 00-Dic 06 Jul 54-Dic 06 Mar 96-Dic 06	Nov 60-Feb 66 y Mar 83-Dic 06
Río Laraquete en El Cajón	Mar 85-Mar 96	Carampangue Concepción DGA Laja	Ene 00-Dic 06 Nov 96-Dic 06 Nov 61-Dic 05	Mar 85-Mar 96
Río Carampangue en Carampangue	Dic 70-Dic 83	Laja	Nov 61-Dic 05	
Estación Fluviométrica	Período Estad. Fluvio.	Estaciones Pluvio asociada	Período Estad. Pluvio	Período apto calib. o valid.
		Las Achiras	Ene 64-Dic 06	

		Los Angeles	Jul 62-Dic 06	Dic 70-Dic 83, correl. dudosa
Río Lebu en Las Corrientes	May 63-Nov 86	Cañete El Vergel (Angol) Los Angeles Las Achiras Fundo	Dic 61-Dic 91 Feb 75-Dic 07 Ene 64-Dic 06 Jul 62-Dic 06	Feb 66-Mar 71 y May 76-May 86
Estero Caramávida en Caramávida	Feb 53-Ene 92	Cañete Curanilahue Parque Nahuelbuta	Dic 61-Dic 91 Jul 97 - Nov 02-	Mar 62-Mar 67 y Mar 71-Sept 79 y Abr 82-Nov 91
Río Butamalal en Butamalal	Ago 50-Dic 06	Contulmo Tranamán Parque Nahuelbuta Cañete	Ene 87-Dic 06 Ene 88-Dic 07 Nov 02-Nov-07 Dic 61-Dic 91	Nov 93-Oct.96 Dic 65-Oct 72 y May 75-Jun 87
Río Cayucupil en Cayucupil	Ago 50-Dic 83	Contulmo Tranamán Parque Nahuelbuta Cañete	Ene 87-Dic 06 Ene 88-Dic 07 Nov 02-Nov-07 Dic 61-Dic 91	Feb 62-Ago 69 y Jun 71-Dic 83
Río Reputo en Reputo	Sep 50-Dic 83	Contulmo Tranamán Parque Nahuelbuta Cañete	Ene 87-Dic 06 Ene 88-Dic 07 Nov 02-Nov-07 Dic 61-Dic 91	Mar 62-Dic 83

c) Observación de períodos concurrentes de evaporación para calibración

Las estaciones evaporimétricas presentes en las cuencas de estudio son en total 29, y se presentan en la cobertura llamada evaporimetricas.shp.

Se procedió a asociar, a cada una de las 20 estaciones fluviométricas que quedan en la selección, y para los períodos preseleccionados en base a las precipitaciones, las estaciones evaporimétricas cercanas, y se hizo el análisis de la concurrencia en el tiempo de la estadística diaria. Este análisis se presenta en el Cuadro N° 8.

Del análisis se desprende que:

- La estación Bullileo en Santa Filomena, cuya estadística fluviométrica es apta para calibración sólo antes de la construcción del embalse Bullileo, esto es, entre los años 1931 y 1945, no presenta mediciones simultáneas de evaporación.
- La estación Cato en Digua, cuya estadística fluviométrica es apta para calibración sólo antes del año 1967, año de la construcción del embalse Digua, no presenta mediciones simultáneas de evaporación.

Cuadro N° 8
Asociación de estaciones fluviométricas, pluviométricas y evaporimétricas
y períodos de calibración

Estación Fluviométrica	Estación Pluvio	Período de calibración/validación según pp	Estac. Evaporim	Período de calib según evap	Observaciones
Estero El Manzano	La Rufina	Ene 60-Dic 83	Potrero Grande	Dic 75-Dic 06	
Río Bullileo en Santa Filomena	Bullileo Embalse	Feb 31-Mar 45	Bullileo Embalse Ancoa Embalse	Jun 80-Dic 06 Feb 65-Dic 06	NO HAY PER COMÚN
Río Cato en Digua	Digua Embalse	Nov 53-Jul 55 y Feb 59-Dic 67	Digua Embalse La Punilla	Ene 75-Dic 06 Feb 65-Ago 86	NO HAY PER COMÚN
Río Cauquenes en El Arrayán	Tutuvén Embalse	Ene 77-Dic 06	Tutuvén emb Parral	Ene 81-Dic 06 Ene 76-Dic 06	
Estero Purapel en Nirivilo	Nirivilo	Mar 66-Dic 71 y Mar 75-Dic 93 y May 00-Ene 04	Liguay Meloza	Dic 78-Dic 06 Oct 80-Dic 06	
Río Niblinto antes BT Embalse Coihueco	Bullileo Embalse	Ene 74-Dic 98	Diguillín	Feb 65-Mar 08	65 a 75 SIN PATRÓN
Río Diguillín en San Lorenzo	Atacalco Fdo.	May 46-Nov 59 y Abr 67-Dic 06	Diguillín	Feb 65-Mar 08	65 a 75 SIN PATRÓN
Río Lonquén en Trehuaco	Coelemu	Feb 86-Feb 05	Tutuvén emb	Ene 81-Dic 06	
Río Lirquén en cerro El Padre	Cerro El Padre	May 43-Dic 06	Quilaco Diguillín	Abr 76-Feb 08 Feb 65-Mar 08	65 a 75 SIN PATRÓN
Río Nicodahue en Pichún	Angol	Abr 88-Feb 91 y Feb 95-Ago 06	Contulmo	Abr 88-Feb 08	
Río Malleco en Collipulli	Laguna Malleco	Oct 55-Oct 72 y Mar 77-Ene 00	Collipulli Manzanar	Dic 68-Dic 72 Dic 73-Sept 88	
Río Pingueral en Dichato	Coelemu	Mar 85-Ene 89 ojo julio 88	El Vergel	Jun 82-Dic 95	
Río Andalién en camino a Penco	Chillancito	Nov 60-Feb 66 y Mar 83-Dic 06	Tutuvén emb	Ene 81-Dic 06	
Río Laraquete en El Cajón	Laja	Mar 85-Mar 96	El Vergel Contulmo	Jun 82-Dic 95 Abr 88-Feb 08	

Estación Fluviométrica	Estación Pluvio	Período de calibración/validación según pp	Estac. Evaporim	Período de calib según evap	Observaciones
Río Carampangue en Carampangue	Los Angeles	Dic 70-Dic 83, correl. dudosa	Angol	Ago 76-Mar 81	
Río Lebu en Las Corrientes	Las Achiras Fundo	Feb 66-Mar 71 y May 76-May 86	Angol	Ago 76-Mar 81	
Estero Caramávida en Caramávida	Cañete	Mar 62-Mar 67 y Mar 71-Sept 79 y Abr 82-Nov 91	El Vergel	Jun 82-Dic 95	
Río Butamalal en Butamalal	Cañete	Dic 65-Oct 72 y May 75-Jun 87 y Nov 93-Oct 96	Traiguén Angol El Vergel	Ene 79 - Ene 08 Ago 76-Mar 83 Jun 82-Dic 95	
Río Cayucupil en Cayucupil	Cañete	Feb 62-Ago 69 y Jun 71-Dic 83	Angol	Ago 76-Mar 83	
Río Reputo en Reputo	Cañete	Mar 62-Dic 83	Angol	Ago 76-Mar 83	

3.5 RESULTADO DE CUENCAS, ESTACIONES Y PERÍODOS DE CALIBRACIÓN

De este modo, después del análisis de las estaciones meteorológicas, quedan 18 estaciones fluviométricas aptas para calibración, que se presentan en el Cuadro N° 9. Estas estaciones se encuentran en la cobertura fluvio3.shp.

Las estaciones pluviométricas/pluviográficas seleccionadas, asociadas a las 18 cuencas, y que se usarán como datos de entrada para la calibración, son en total 15, y se encuentran en la cobertura pluvio2.shp.

Las estaciones evaporimétricas seleccionadas, asociadas a las 18 cuencas de calibración, cuyos datos se usarán como datos de entrada para la calibración, son en total 8, y se presentan en la cobertura evap1.shp.

Como las estaciones evaporimétricas son pocas, y tienen en general estadísticas muy cortas (en su mayoría recién a partir de 1985), se procedió a rellenar algunos períodos, según se explica en el capítulo 6, con lo cual se llegó a los períodos de calibración/validación definitivos del Cuadro N° 9.

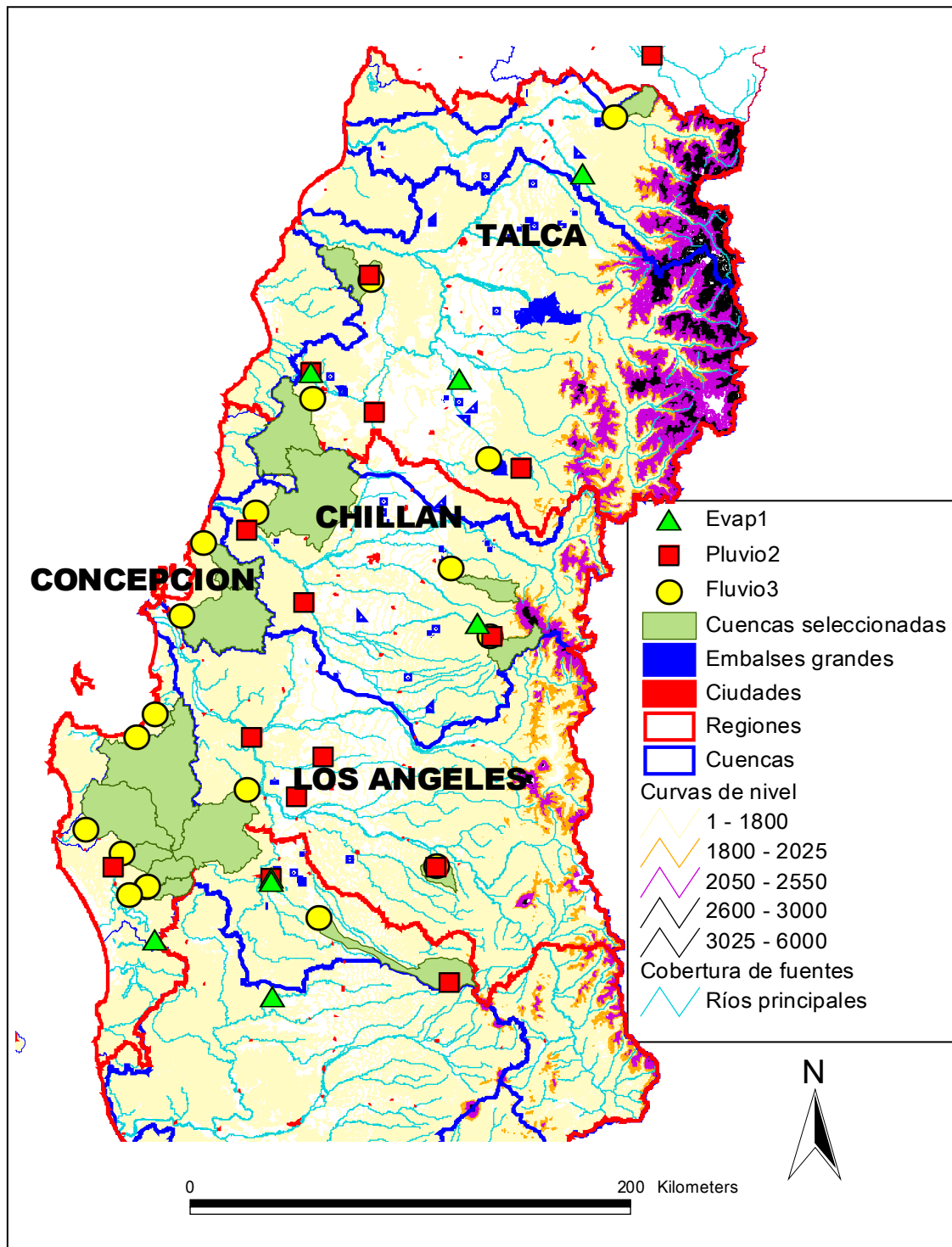
En la cobertura cuencas seleccionadas.shp se presenta el trazado de las cuencas aportantes a las 18 estaciones fluviométricas seleccionadas, que se incluyen en la Figura N° 12, junto con las coberturas fluvio3.shp, pluvio2.shp y evap1.shp.

Cuadro N° 9
Determinación de estadísticas fluvio, pluvio y evaporimétricas
y períodos de calibración definitivos

Nº	Estación Fluviométrica	Estación Pluvio	Estac. Evapo	Período definitivo
1	Estero El Manzano	La Rufina	Potrero Grande	Ene 76-Dic 83
2	Río Cauquenes en El Arrayán	Tutuvén Embalse	Tutuvén emb	Ene 81-Dic 06
3	Estero Purapel en Niriivilo	Niriivilo	Liguay	Ene 79-Dic 93 y May 00-Ene 04
4	Río Niblinto antes BT Emb. Coihueco	Bullileo Embalse	Diguillín	Ene 75-Dic 98
5	Río Diguillín en San Lorenzo	Atacalco Fdo.	Diguillín	Ene 75-Dic 06
6	Río Lonquén en Trehuaco	Coelemu	Tutuvén emb	Feb 86-Feb 05
7	Río Lirquén en cerro El Padre	Cerro El Padre	Diguillín	Ene 75-Dic 06
8	Río Nicodahue en Pichún	Angol	Contulmo	Abr 88-Feb 91 y Ene 96-Dic 2006
9	Río Malleco en Collipulli	Laguna Malleco	Diguillín	Mar 77-Ene 00
10	Río Pingueral en Dichato	Coelemu	El Vergel	Mar 85-Ene 89
11	Río Andalién en camino a Penco	Chillancito	Tutuvén emb	Mar 83-Dic 06
12	Río Laraquete en El Cajón	Laja	El Vergel	Mar 85-Dic 95
13	Río Carampangue en Carampangue	Los Angeles	Angol	Ago 76-Dic 83
14	Río Lebu en Las Corrientes	Las Achiras Fundo	Angol	May 76-Dic 83
15	Estero Caramávida en Caramávida	Cañete	El Vergel	Jun 82-Nov 91
16	Río Butamalal en Butamalal	Cañete	Traiguén	Ene 79-Jun 87 y Nov 93-Oct 96
17	Río Cayucupil en Cayucupil	Cañete	Angol	Ago 76-Dic 83
18	Río Reputo en Reputo	Cañete	Angol	Ago 76-Dic 83

-

Figura N° 12
Asociación de estaciones fluviométricas,
cuencas seleccionadas (cuencas seleccionadas .shp),
estaciones pluviométricas representativas (pluvio2.shp)
y evaporimétricas cercanas (evap1.shp)



CAPÍTULO 4

PRECIPITACIONES: OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO A

4.1 IDENTIFICACIÓN DE GRUPOS DE ESTACIONES

De acuerdo con lo señalado en el capítulo 3.4, se seleccionaron 55 estaciones pluviométricas/pluviográficas que cubrieran el área de las 21 estaciones fluviométricas o cuencas aptas para calibración, antes del análisis de simultaneidad de registros con estaciones pluvio y evaporimétricas. Estas 55 estaciones configuran la cobertura pluvio1.shp.

Para estas 55 estaciones se llevó a cabo un análisis de similitud, comparando visualmente los gráficos de precipitaciones diarias de las estaciones en función del tiempo durante la totalidad de su periodo de vigencia. Como resultado se obtuvo que estas estaciones se ordenaban en seis grupos, según se muestra en el Cuadro N° 10.

Cuadro N° 10
Estaciones por grupos

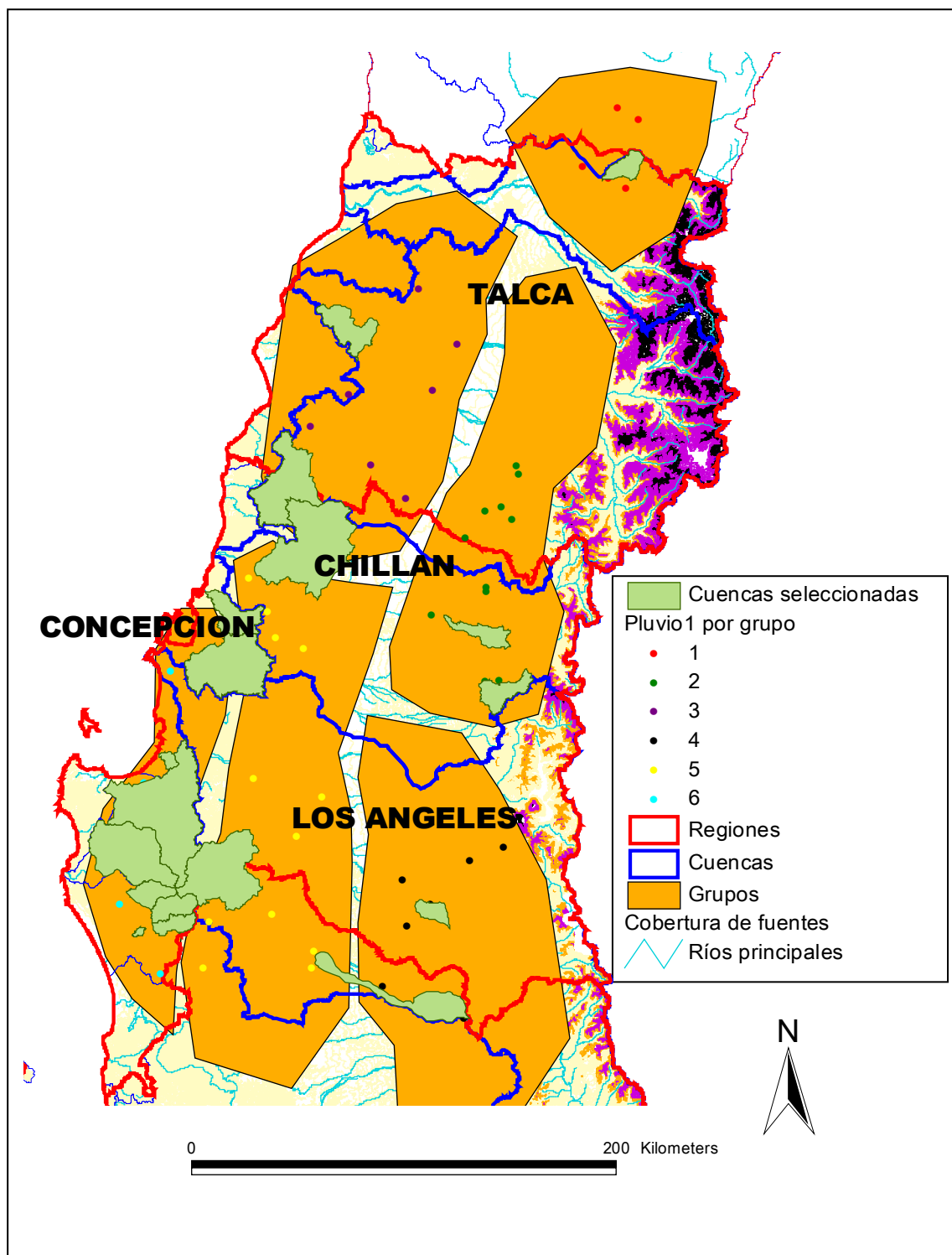
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
LA RUFINA TINQUIRIRICA BAJO BRIONES - DCP RIO TENO JUNTA CLARO - DCP EL MANZANO SANTA SUSANA	DIGUA EMBALSE SAN MANUEL EN PERQUILAUQUEN LONGAVI EN LA QUIRIQUINA - DCP BULLILEO EMBALSE LA SEXTA DE LONGAVI JUAN AMIGO ÑUBLE EN SAN FABIAN 2 - DCP SAN FABIAN COIHUECO EMB ATACALCO FUNDO LAS TRANCAS SAN LORENZO FUNDO	QUELLA EL ALAMO TUTUVEN EMBALSE LA ESTRELLA NIRIVILO PENCAHUE MANGARRAL SAN JAVIER MELOZAL PARRAL	QUILLAILEO CERRO EL PADRE QUILACO SAN LORENZO BIO-BIO POCO A POCO ENCINAR MALLECO LAGUNA MALLECO TOLHUACA	SAN AGUSTIN DE PUNUAL CHILLANCITO CANCHA LOS LITRES RAFAEL COELEMU LOS ANGELES LAS ACHIRAS FUNDO LAJA COLLIPULLI ERCILLA VIDA NUEVA ANGOL (LA MONA) PARQUE NAHUEL BUTA TRANAMAN	LAS PATAGUAS ANDALIEN CONCEPCION DGA CARANPANGUE CURANILAHUE CAÑETE CONTULMO

Graficando estos 6 grupos en ArcView, se ilustró además que los grupos formados correspondían a zonas geográficas u orográficas bien definidas y homogéneas, validando la clasificación hecha según el análisis comparativo visual de ellas.

Los grupos de estaciones del conjunto pluvio1.shp definen una cobertura llamada grupos.shp, y se presentan en la Figura N° 13 adjunta.

Las estadísticas diarias de estas estaciones, ordenadas por grupos, se presentan en la carpeta 4.1 Grupos del Anexo Digital.

Figura N° 13
Clasificación de estaciones pluviométricas en grupos (grupos.shp)



4.2 ESTABLECIMIENTO DEL PATRÓN DE PRECIPITACIONES

Para cada uno de los grupos se eligió la estación más representativa, esto es, una estación de gran longitud y de buena calidad (en lo posible sin períodos sin datos), o estación tipo, para incluirla en un patrón. En el Cuadro N° 11 se presentan las estaciones seleccionadas de cada grupo para formar el patrón.

Cuadro N° 11
Estaciones del patrón

Grupo	Estación
1	La Rufina
2	Bullileo Embalse
3	San Javier
4	Cerro El Padre
5	Chillancito
6	Cañete

Con estas estaciones se configuró un patrón, dentro del cual se probó cada una de las estaciones, y con ello, cada uno de los grupos.

El establecimiento del patrón tiene por objetivo tener una forma de verificar la calidad y consistencia de cada una de las estaciones con las que luego se caracteriza el régimen pluvial en las cuencas de calibración.

El patrón se presenta en el Anexo Digital, en un archivo llamado 4.2 Análisis doble masa precipitación.xls, que contiene tanto las estadísticas completas de cada estación, como su comportamiento individual dentro del patrón. El patrón tiene una longitud de 32 años, entre 1975 y 2006. Todas las estaciones utilizadas tienen estadísticas completas, con las excepciones de San Javier y Cañete, que en dicho período están casi completas. Ambas fueron completadas, la primera con Melozal, y la segunda con Angol y Contulmo, según se indica al pie de cada una de las tablas. Las estaciones de relleno se eligieron en base a criterios de semejanza y cercanía, observando en forma comparativa los gráficos de precipitación diaria.

Es interesante observar que las seis estaciones representantes de cada uno de los grupos, presentan tendencias sin quiebre en relación con el patrón, es decir, se comportan de acuerdo con el patrón. Además, se asume que cada estación representa bien las características de su grupo, de modo que se acepta entonces la validez de este patrón para revisar la validez y la consistencia de todas las estaciones que se usarán para caracterizar el régimen de las cuencas de calibración.

4.3 SELECCIÓN DE ESTACIONES PARA CARACTERIZAR EL RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO DE LAS CUENCAS

Este análisis tuvo por objetivo seleccionar las estaciones cuyas estadísticas fueran consistentes, para utilizarlas en la caracterización del régimen pluvial de las cuencas de calibración. Una estación tiene estadísticas consistentes si durante el período de observación ha permanecido en las mismas condiciones, esto es, sin cambios importantes de posición, sin cambios significativos en las condiciones del predio, ni otros.

Antes de realizar esta verificación, hubo que descartar algunas estaciones. El primer criterio de descarte responde al hecho que, para caracterizar el régimen de las cuencas de calibración, se requiere trabajar con un mismo período de estadística. El período seleccionado, en que un gran número de estaciones presenta estadísticas de calidad, abarca desde 1975 hasta 2006 (32 años). Por lo tanto, se descartaron todas las estaciones cuya estadística requiriera relleno para más del 25% del período estudiado (8 años), ya fuera por extensión o por relleno. Con este criterio se descartaron 29 estaciones, quedando preseleccionadas 26 estaciones.

Como excepción se mantuvieron adicionalmente 3 estaciones que no verificaban este primer criterio, pero que no se excluyeron del análisis, por ser representativas de áreas con pocas o ninguna otra estación. Estas estaciones son Encinar Malleco, Tranamán y Contulmo.

Por otro lado, se decidió incluir en este análisis cinco estaciones de estadística larga y de buena calidad, y por lo tanto de utilidad para el cálculo del parámetro A, aunque no forman parte de las 55 estaciones descriptivas del Cuadro N° 10. Estas estaciones son las siguientes: Diguillín (grupo 2), Colorado (grupo 2), Gualleco (grupo 3), Cholguán (grupo 4) y Tucapel (grupo 4).

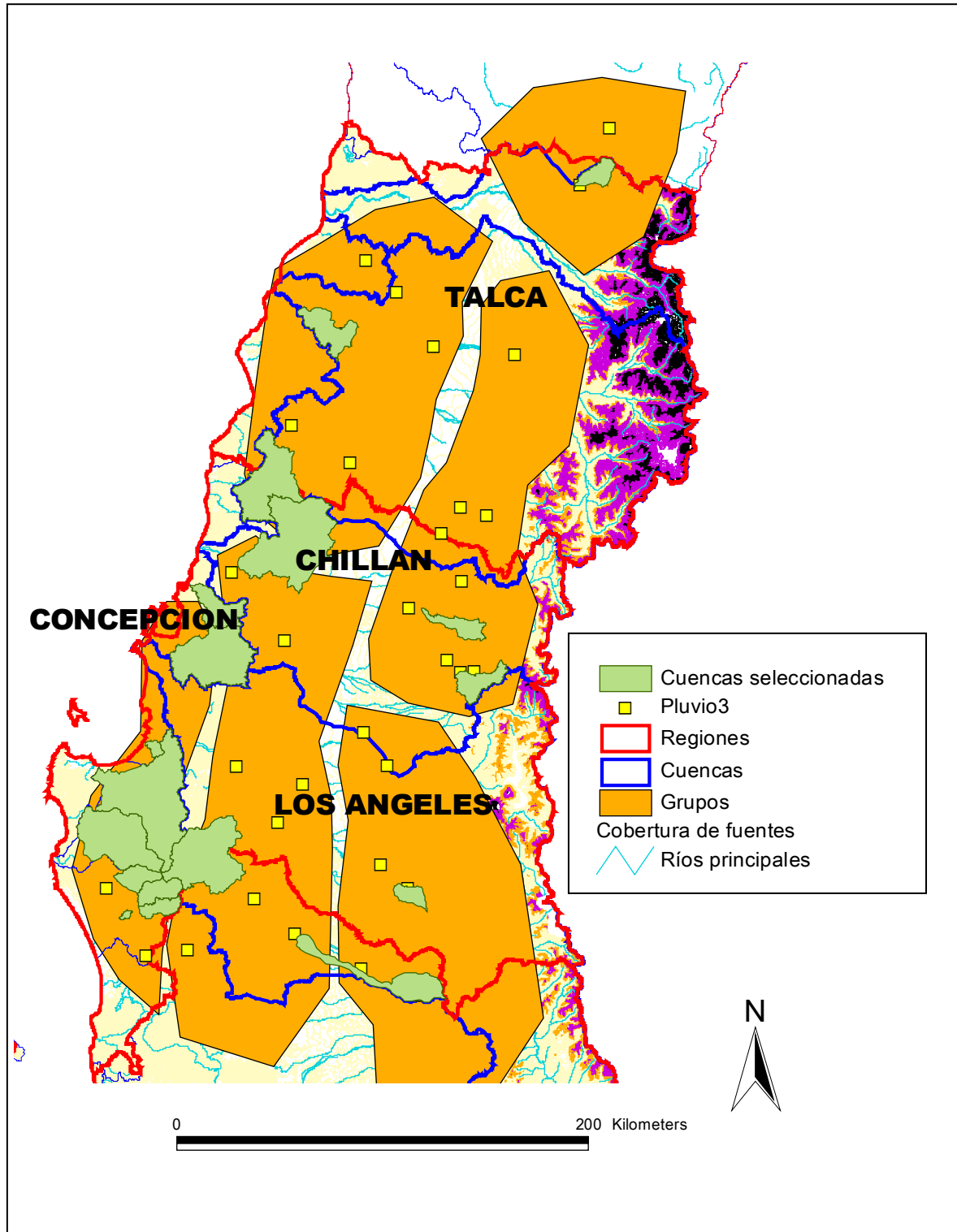
Considerando todo lo anterior, se tiene un listado de 34 estaciones que se presentan, por grupo, en el siguiente Cuadro N° 12, y que configuran la cobertura pluvio3.shp. En negrillas se señala la estación representativa de cada grupo, que juntas configuran el patrón.

Cuadro N° 12
Estaciones pluviométricas usadas para caracterizar el régimen de las cuencas

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3		Grupo 5	Grupo 6
LA RUFINA EL MANZANO	COLORADO DIGUA EMBALSE SAN MANUEL EN PERQUILAUQUEN BULLILEO EMBALSE DIGUILLÍN SAN FABIAN COIHUECO EMB ATACALCO FUNDO LAS TRANCAS SAN LORENZO FUNDO	QUELLA TUTUVEN EMBALSE GUALLECO NIRIVILO PENCAHUE SAN JAVIER	CHOLGUÁN CERRO EL PADRE TUCAPEL QUILACO ENCINAR MALLECO LAGUNA MALLECO	CHILLANCITO COELEMU LOS ANGELES LAS ACHIRAS FUNDO LAJA COLLIPULLI ANGOL (LA MONA) TRANAMAN	CAÑETE CONTULMO

En la Figura N° 14 adjunta se observa la ubicación de las cuencas y de las 34 estaciones seleccionadas de la cobertura pluvio3.shp.

Figura N° 14
Estaciones pluviométricas/gráficas usadas
para caracterizar el régimen de las cuencas (pluvio3.shp)



4.4 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS

En base al patrón obtenido en el punto 4.2, se pudo rellenar por regresión lineal, y verificar, cada una de las 34 estaciones seleccionadas, utilizando un análisis de doble masa. Cabe mencionar aquí que cada estación se rellenó con la estación “tipo” de su grupo respectivo. Los resultados del análisis doble masa se presentan graficados en el archivo 4.2 Análisis doble masa precipitación.xls del Anexo Digital.

Al respecto, se observó que la mayoría de las estaciones no presentan quiebres ni desvíos, y se ajustan adecuadamente al comportamiento del patrón. En estos casos se pudo asumir que las estaciones son consistentes.

Sin embargo, algunas estaciones presentan alguna anomalía. Las estaciones San Fabian, San Javier y Nirivilo se desvían del patrón al centro del período, pero se vuelven a ajustar a él después. Como el mismo fenómeno se observó de forma parecida en varias estaciones cercanas, se asumió que este comportamiento podía tener como origen condiciones orográficas particulares, que el patrón no tomaba en cuenta, y por lo tanto las estadísticas se conservaron sin cambios.

Por otro lado, las estaciones Las Achiras Fundo y Laja presentan una anomalía de desvío de la recta de ajuste en su parte final, o sea en los años más recientes. Este comportamiento no pudo atribuirse a ningún evento en especial, por lo que no se adoptaron medidas de corrección.

De este modo, el análisis realizado permitió aceptar como aptas las estaciones seleccionadas, para utilizar el período 1975-2006 de sus estadísticas en la caracterización del régimen de precipitación de las cuencas y de las estaciones representativas de cada cuenca de calibración.

4.5 CÁLCULO DEL PARÁMETRO A

El parámetro A es el factor que multiplica la precipitación puntual para obtener la precipitación areal, de modo que se calcula como el cociente entre la precipitación media areal de la cuenca, y la precipitación media puntual de la estación asociada.

a) Cálculo de la precipitación media puntual

Utilizando las estadísticas rellenas en el periodo 1975-2006, se calculó el valor de la precipitación media anual puntual para cada estación de pluvio3.shp, para dicho periodo. Los valores calculados se encuentran en el siguiente Cuadro N° 13. Se verificó la coherencia del valor puntual calculado en una estación con respecto a su ubicación en el mapa de isohietas.

Cuadro N° 13
Precipitación media anual en estaciones seleccionadas

GRUPO	ESTACIÓN	PP MEDIA ANUAL mm
1	LA RUFINA	1186,5
	EL MANZANO	1333,8
2	BULLILEO EMBALSE	2213,5
	ATACALCO FUNDO	2389,7
	LAS TRANCAS	2393,8
	DIGUA EMBALSE	1529,0
	SAN MANUEL EN PERQUILAUQUEN	1520,1
	DIGUILLIN	2164,5
	COIHUECO EMBALSE	1518,5
	SAN FABIAN	2015,2
	COLORADO	1148,5
	SAN LORENZO FUNDO	2444,2
3	SAN JAVIER	773,5
	PENCAHUE	690,1
	NIRIVILO	845,7
	TUTUVEN EMBALSE	915,7
	QUELLA	722,1
	GUALLECO	849,7
4	CERRO EL PADRE	2151,9
	CHOLGUAN	1446,3
	TUCAPEL	1643,7
	ENCINAR MALLECO	2092,7
	LAGUNA MALLECO	3030,9
	QUILACO	1581,3
5	CHILLANCITO	1099,0

GRUPO	ESTACIÓN	PP MEDIA ANUAL mm
6	COELEMU	894.3
	LOS ANGELES	1142.5
	LAJA	1113.6
	COLLIPULLI	1332.1
	ANGOL (LA MONA)	1173.0
	TRANAMAN	994,9
	LAS ACHIRAS FUNDO	1079.0
	CAÑETE	1311.0
	CONTULMO	1571,2

b) Cálculo de la precipitación media areal

El valor de la precipitación media areal en cada una de las cuencas de calibración se obtuvo en base a dos métodos. Por un lado, se usaron los valores medios puntuales para obtener los polígonos de Thiessen correspondientes, y se calculó la precipitación sobre las cuencas a partir de ellos, y por otro lado, ésta se obtuvo en base a los mapas de isohietas del Balance Hídrico. En la Figura N° 15 se muestran las cuencas y las 34 estaciones que permiten definir los polígonos de Thiessen (coberturas pgon.shp y pluvio3.shp). En la Figura N° 16 están las cuencas y las isohietas del Balance Hídrico (cobertura isoyetas.shp).

La precipitación media areal sobre cada una de las cuencas seleccionadas para calibración se presenta en el Cuadro N° 14. Las planillas de cálculo correspondientes se encuentran en la carpeta 4.5 Cálculo A del Anexo Digital.

Figura N° 15
Cuencas y polígonos de Thiessen

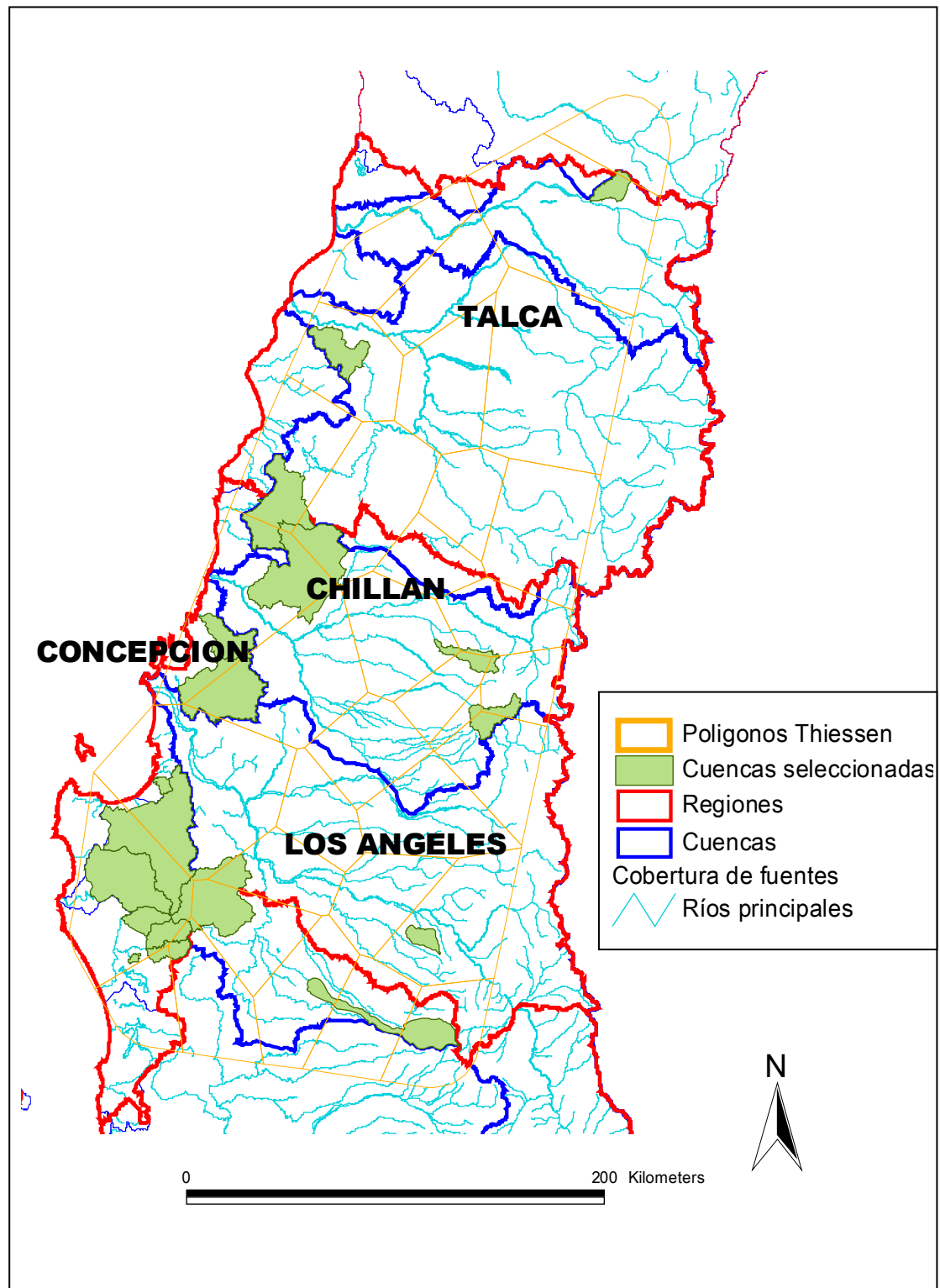


Figura N° 16
Cuencas e isohietas



c) **Valores obtenidos para A**

Se obtuvieron para cada cuenca dos valores para el parámetro A, uno según el método de polígonos de Thiessen y otro según las isohietas.

Las planillas de cálculo correspondientes se encuentran en la carpeta 4.5 Calculo A del Anexo Digital, y los valores calculados se encuentran resumidos en el Cuadro N° 14 a continuación.

Finalmente se optó por uno de ambos valores de A, en función de la mayor o menor resolución de ambos métodos en la ubicación de cada cuenca. En muchos casos, los valores resultaron similares por ambos métodos. El método seleccionado también se presenta en el Cuadro N° 14.

Cuadro N° 14
Obtención del parámetro A

Estación fluviométrica / Cuenca	Área hectáreas	Pp anual puntual mm	Pp areal Thiessen mm	Pp areal Isohietas mm	Parámetro A Thiessen	Parámetro A Isohietas	Método seleccionado	Parámetro A valor adoptado
Est. El Manzano antes junta Río Teno	13330	1186.5	1321.2	1292.0	1.11	1.09	similar	1.11
Río Cato en Digua	12188	1529.0	1924.6	2350.3	1.26	1.54	Isohietas	1.54
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	16162	2213.5	2036.0	2082.5	0.92	0.94	similar	0.92
Río Diguillín en San Lorenzo	19922	2389.7	2419.4	2500.0	1.01	1.05	similar	1.01
Río Purapel en Nirivilo	28861	845.7	845.7	800.0	1.00	0.95	similar	0.97
Río Cauquenes El Arrayan	62557	915.7	900.4	752.5	0.98	0.82	Thiessen	0.98
Río Lirquén en Cerro El Padre	10152	2151.9	2151.9	3562.7	1.00	1.66	Isohietas	1.66
Río Malleco en Collipulli	41002	3030.9	2532.6	2575.7	0.84	0.85	similar	0.84
Río Lonquén en Trehuaco	109088	894.3	856.0	866.9	0.96	0.97	similar	0.96
Río Pingueral en Dichato	25201	894.3	898.5	1250.7	1.00	1.40	Isohietas	1.40
Río Nicodahue en Pichún	79199	1173.0	1175.8	1305.6	1.00	1.11	Thiessen	1.00
Río Andalien camino a Penco	74020	1099.0	1051.2	1402.3	0.96	1.28	Isohietas	1.28
Río Laraquete en el Cajón	3877	1113.6	1113.6	1200.0	1.00	1.08	Isohietas	1.08
Río Carampangue en Carampangue	120403	1142.5	1209.4	2004.5	1.06	1.75	Isohietas	1.75
Río Lebu en Las Corrientes	71738	1079.0	1311.6	2360.2	1.22	2.19	Isohietas	2.19
Río Caramávida en Caramávida	14897	1311.6	1311.6	2935.1	1.00	2.24	Isohietas	2.24
Río Cayucupil en Cayucupil	16873	1311.6	1238.9	2298.9	0.94	1.75	Isohietas	1.75
Río Butamal en Butamal	11443	1311.6	1218.9	1913.1	0.93	1.46	Isohietas	1.46
Río Reputo en Reputo	1430	1311.6	1311.6	1674.5	1.00	1.28	Isohietas	1.28

Estación fluviométrica / Cuenca	Área hectáreas	Pp anual puntual mm	Pp areal Thiessen mm	Pp areal Isohietas mm	Parámetro A Thiessen	Parámetro A Isohietas	Método seleccionado	Parámetro A valor adoptado
Est. El Manzano antes junta Río Teno	13330	1186.5	1321.2	1292.0	1.11	1.09	Thiessen	1.11
Río Cato en Digua	12188	1529.0	1924.6	2350.3	1.26	1.54	Isohietas	1.54
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	16162	2213.5	2036.0	2082.5	0.92	0.94	Thiessen	0.92
Río Diguillín en San Lorenzo	19922	2389.7	2419.4	2500.0	1.01	1.05	Thiessen	1.01
Río Purapel en Nirivilo	28861	845.7	845.7	800.0	1.00	0.95	-	0.97
Río Cauquenes El Arrayan	62557	915.7	900.4	752.5	0.98	0.82	Thiessen	0.98
Río Lirquén en Cerro El Padre	10152	2151.9	2151.9	3562.7	1.00	1.66	Isohietas	1.66
Río Malleco en Collipulli	41002	3030.9	2532.6	2575.7	0.84	0.85	Thiessen	0.84
Río Lonquén en Trehuaco	109088	894.3	856.0	866.9	0.96	0.97	Thiessen	0.96
Río Pingueral en Dichato	25201	894.3	898.5	1250.7	1.00	1.40	-	1.20

Verificación de datos: T. Emb. Coihueco, F. 2464925
 Dirección: 4026-1, Fax: 20822945
 e-mail: rodhos@rodhos.org

CAPÍTULO 5**PRECIPITACIONES:****OBTENCIÓN DE FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIOS**

De acuerdo con el comportamiento diario de las precipitaciones y caudales, observados en gráficos especiales para determinar períodos y parejas de estaciones para la calibración (gráficos Q-P del Anexo Digital), se pudo comprobar que el método de Stowhas para generar precipitaciones horarias puede ser mejorado, generando precipitaciones horarias a lo largo del día, más realistas que las que se obtienen a partir de factores de distribución de la lluvia dentro de una misma tormenta.

La primera propuesta de esta consultora para mejorar los datos de entrada de precipitación horaria al modelo SIMED, fue la de utilizar las estadísticas horarias que están directamente disponibles en las estaciones pluviográficas, y aplicar la distribución hora a hora de las estadísticas pluviográficas afines, a las estadísticas diarias de la estaciones pluviométricas de calibración. Para ello se efectuó el análisis de asociación entre estaciones pluviométricas y pluviográficas afines que se presentó en la etapa 2.

Sin embargo, como este método requiere modificar la forma en que el modelo SIMED recibe la información de entrada, y dicha modificación no pudo ser realizada (por el especialista de la DGA) en el plazo de este estudio, se tuvo que desechar esta proposición metodológica.

No obstante lo señalado, en esta etapa 3 se presenta una nueva metodología de generación de precipitaciones horarias a partir de precipitaciones diarias, que fue debatida y aceptada por la Inspección Fiscal. Este método busca mejorar la forma de generación de factores de distribución, en relación con la utilizada anteriormente.

5.1 SELECCIÓN DE ESTACIONES PARA EL ANÁLISIS

Para distribuir las lluvias diarias de una estación, en lluvia horaria, el modelo SIMED utiliza como primer dato de entrada el monto de la lluvia total diaria. El modelo distingue entre días de lloviznas (entre 0 y 1 mm al día), de lluvias (mayores que 1 hasta 10 mm al día) y de tormentas (sobre 10 mm al día), y les da un tratamiento distinto. Como segundo dato de entrada, el modelo recibe los factores de distribución horarios de la lluvia diaria, para cada uno de los tipos de día de que se trate, o sea, recibe factores de distribución horaria para días de lloviznas, lluvias y tormentas. Se trata entonces, de encontrar factores de distribución propios de días con lloviznas, lluvias y tormentas, en cada una de las estaciones que se usarán en la calibración.

Como se señala en el capítulo 4.1, las estaciones de precipitación se han podido agrupar de acuerdo con el comportamiento de la precipitación diaria, que presenta patrones de distribución similares de acuerdo con su ubicación geográfica. Es totalmente válido imaginar que si dentro de un grupo son similares los patrones de comportamiento diario, muy probablemente también lo sean los patrones de distribución horaria. Bajo este supuesto, el análisis que se señala a continuación, se realizó para una estación representativa, necesariamente pluviográfica, de cada uno de los grupos de estaciones pluviométricas/gráficas determinadas en el Cuadro N° 10 del capítulo 4.1.

Las estaciones seleccionadas para realizar el análisis de los factores de distribución horarios, se presentan en el Cuadro N° 15. Se asume que el comportamiento horario de la estación representativa será similar al comportamiento horario de las demás estaciones del mismo grupo.

Cuadro N° 15
Estaciones pluviográficas para obtención de factores de distribución

Grupo N°	Estación PG representativa
1	Convento Viejo
2	Bullileo Embalse
3	San Javier
4	Cerro El Padre
5	Chillán Viejo
6	Contulmo

El procedimiento que se ha desarrollado para cada estación pluviográfica, se presenta a continuación.

5.2 DÍA REPRESENTATIVO DE LA SERIE

Todo el análisis que se describe a continuación, realizado para cada una de las estaciones seleccionadas, se entrega en el archivo 5.2 Coeficientes Horarios Precipitación.xls, que se encuentra en el Anexo Digital.

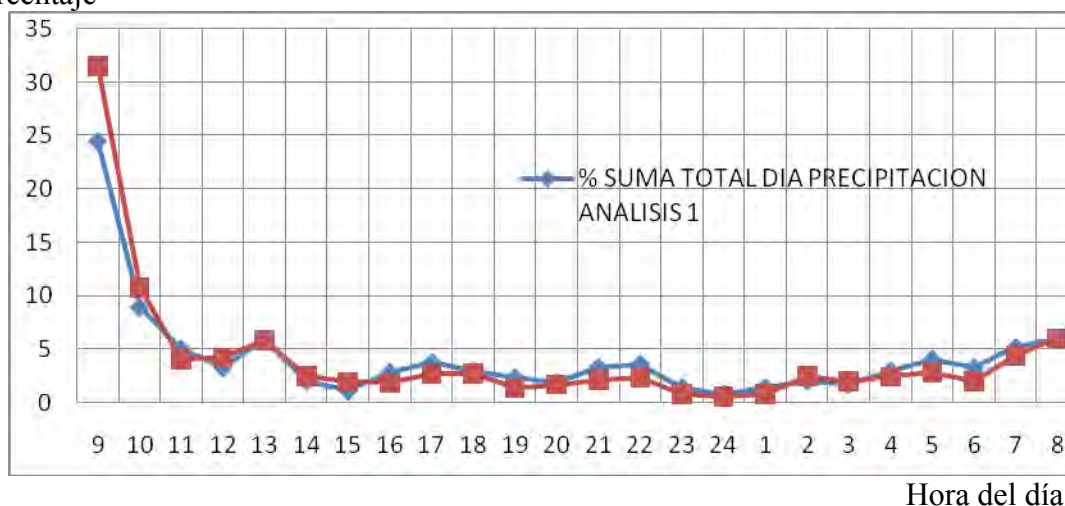
El análisis de cada estación se inicia ordenando los días de acuerdo con su precipitación total diaria. De este modo, se juntan todos los días de llovizna, lluvia y tormenta. Para cada tipo de día, el análisis es el mismo.

Para todos los días de un mismo tipo, se suman las precipitaciones de cada hora, y esta suma se expresa como porcentaje de la suma total de precipitación caída (mm) en el total de los días analizados. De aquí se obtiene una curva de distribución horaria de mm caídos, como la de la Figura N° 17. Esta curva varía según la estación y según el tipo de día.

Paralelamente, se calcula para los mm de cada hora, sus factores de distribución (porcentajes) con respecto a la lluvia total diaria. Se suman los factores de distribución de cada hora del día, y esta suma se expresa como porcentaje de la suma total de factores de distribución sobre el total de días analizados. Se obtiene una curva de distribución horaria de los factores de distribución, como la de la Figura N° 17. Esta curva resulta similar, aunque no igual, a la curva de distribución horaria de los mm caídos.

Figura N° 17
Curva de distribución del agua caída
Estación Bullileo, días de llovizna (hasta 1 mm)

Porcentaje



Por otro lado, en la misma planilla de los factores de distribución, se registra, para cada día, los siguientes datos:

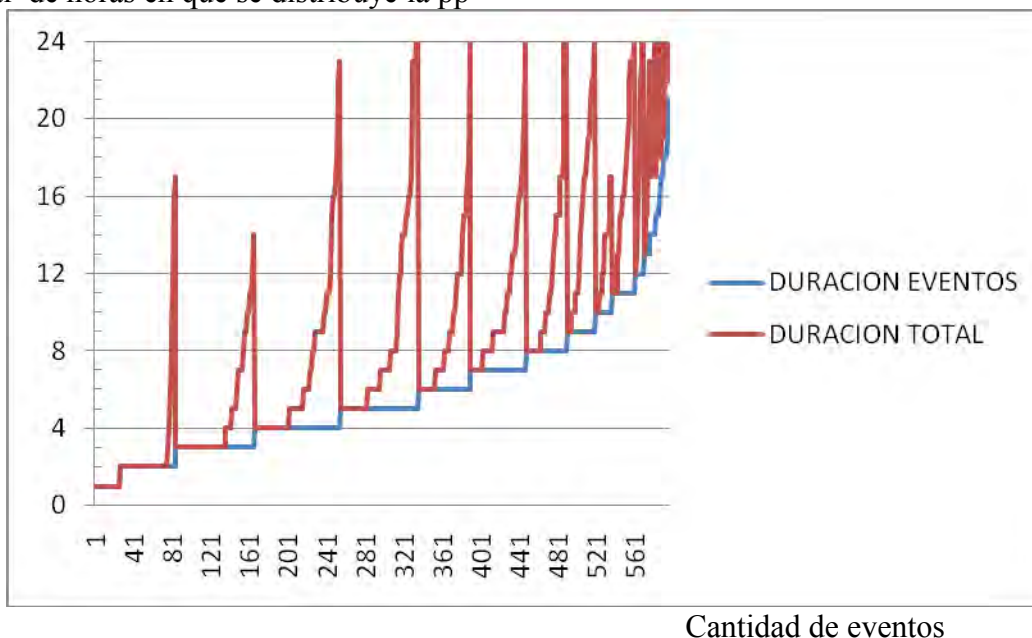
- la hora de inicio y término de las lluvias, y con ello, el lapso en que llueve
- la cantidad de horas que efectivamente contienen un dato de precipitación, esto es, la cuenta de las horas de lluvia, y
- como consecuencia de ello, si la precipitación del día es conexas o inconexas.

Así, por ejemplo, un día cualquiera, puede llover 10 horas, distribuidas en 17 horas, con lo cual la precipitación es inconexa.

Para obtener un día representativo de la serie de días de un mismo tipo, se calcula la mediana de la cantidad de horas de lluvia efectiva, y, para la cantidad resultante de horas, la mediana del lapso en que ellas ocurren. Así, entonces, se obtiene un día representativo para el tipo de lluvia analizado, que puede ser, por ejemplo, un día con 5 horas de precipitación, distribuidas en 6 horas, como es el caso de las lluvias entre 1 y 10 mm en la estación Bullileo, según se observa en la Figura N° 18.

Figura N° 18
Cantidad de horas de lluvia y lapso en que ocurren

Total de horas en que se distribuye la pp



5.3 UBICACIÓN DE LAS HORAS DE LLUVIA DENTRO DEL DÍA

Con el dato de ambas medianas, se vuelve a las curvas de distribución horaria, en especial, a la de los factores de distribución, y se ubica la lluvia de las características que indican las medianas, por ejemplo, la lluvia de 5 horas distribuidas en 6 horas, sobre la curva de distribución, escogiendo los puntos más altos de la curva. La lluvia se distribuye en forma total en las horas más altas de la curva, tomando como base para el prorrato, los factores determinados antes para cada hora.

Las cantidades de horas de lluvia representativa de cada tipo de día, y el lapso representativo en que dichas lluvias ocurren, se presentan en el Cuadro N° 16.

Cuadro N° 16
Cantidad de horas de lluvia y lapso en que ocurren

GRUPO	ESTACION PLUVIOGRAFICA	Hasta 1 mm		Entre 1 y 10		Sobre 10 mm	
		Cant h	Lapso	Cant h	Lapso	Cant h	Lapso
1	Convento Viejo	2	2	6	8	13	15
2	Bullileo Embalse	2	2	5	6	15	18
3	San Javier	2	2	5	6	12	18
4	Cerro El Padre	2	2	6	9	13	17
5	Chillán Viejo	2	3	6	11	12	17
6	Contulmo	2	4*	7	11	15	20

Nota *: pocos datos. Gráficamente parece más acertado usar 3

5.4 FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIOS

En el Cuadro N° 18, se presentan los factores de distribución que se obtienen para cada estación representativa, y para cada tipo de día. En dicho cuadro, presentado con colores tipo raster, se aprecia que las lloviznas tienen una clara tendencia de producirse en la mañana, entre las 8 y las 10 horas. Las lluvias representativas tienen una tendencia a producirse de madrugada y mañana. En cuanto a las tormentas, su distribución está mejor distribuida a lo largo del día.

En el Cuadro N° 17 se señalan las estaciones de calibración ordenadas por grupo, a las que se aplicarán los factores de distribución obtenidos en las estaciones representativas.

Cuadro N° 17
Estaciones a las que se aplican los factores de distribución determinados

GRUPO	Estación Pluviográfica	Estaciones de calibración representadas
1	Convento Viejo	<i>La Religiosa</i>
2	Bullileo Embalse	<i>Bullileo Embalse</i>
3	San Javier	<i>Alcance Fénix</i> <i>Alvik</i> <i>Calla</i> <i>Llanón Embalse</i>
4	Cerro El Padre	<i>Cerro El Padre</i> <i>Laguna Nubecc</i>
5	Chillán Viejo	<i>Celma</i> <i>Gillancito</i> <i>Laja</i> <i>Las Albas Fénix</i> <i>Los Angeles</i> <i>Angel (La Alca)</i>
6	Contulmo	<i>Carite</i>

Cuadro N° 18
Factores de distribución de precipitaciones

GRUPO	ESTACION PLUVIOGRA	RANGO PRECIPIT. DIARIA	HORA																							
			1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00
1	Convento Viejo	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0.623	0.377	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0.109	0	0	0.149	0.172	0.177	0.223	0.17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0.073	0.07	0.073	0.076	0.083	0.088	0.087	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.077	0.083	0.077	0.069	0.072	0	0	0.071
2	Bullileo Embalse	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0.746	0.255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0	0	0.105	0	0.196	0.316	0.194	0.189	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0	0	0	0	0.06	0.069	0.066	0	0	0.069	0.065	0.07	0.066	0.066	0.067	0.07	0.069	0.072	0.065	0.066	0	0.061	0	0
3	San Javier	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0.607	0.393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0	0	0.165	0	0.199	0.231	0.233	0.172	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0	0.071	0	0	0	0	0	0	0.076	0	0.082	0.076	0	0.078	0.084	0.075	0.073	0.08	0	0	0.071	0.073	0.079	0.082
4	Cerro El Padre	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0.612	0.388	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0	0	0	0	0.145	0.175	0.234	0.202	0.131	0	0	0	0.113	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0	0.073	0.073	0.077	0.083	0.078	0.082	0.081	0.074	0	0	0	0	0.074	0.073	0.079	0.075	0.079	0	0	0	0	0	0
5	Chillán Viejo	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0.279	0.494	0.227	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0	0	0	0	0	0.178	0.209	0.13	0	0	0	0	0	0	0.147	0.16	0.175	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0	0.073	0.074	0.081	0	0	0	0	0.073	0.107	0.082	0.089	0.077	0.08	0	0.087	0.077	0.099	0	0	0	0	0	0
6	Contulmo	Fksta 1 mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0.568	0	0.432	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Fksta 1 y 10 mm	0	0	0	0.124	0	0.133	0.126	0.149	0.194	0.149	0.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Diste 10 mm	0	0	0	0.075	0.087	0.09	0.072	0.083	0.064	0	0	0	0.061	0.055	0.058	0.064	0.06	0.072	0	0.067	0	0.062	0.05	0

CAPÍTULO 6**EVAPORACIÓN:
OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO B**

El parámetro B es el factor que multiplica la evaporación puntual de tanque para obtener la evapotranspiración areal de la cuenca, de modo que se calcula como el cociente entre la evapotranspiración areal de la cuenca y la evaporación media puntual de tanque de la estación asociada. A diferencia del parámetro A, este parámetro B representa dos conceptos, es decir, incluye en realidad dos factores que podrían llamarse B1 y B2. El parámetro B1, que multiplica la evaporación de tanque puntual para obtener la areal, es equivalente al parámetro A. El parámetro B2 multiplica la evaporación de tanque areal para obtener la evapotranspiración areal, es decir, tiene un valor aproximado de 0,6 a 0,7. La multiplicación de ambos entrega el parámetro B. Para la calibración, sería más conveniente contar con estos valores por separado, por lo cual se señala este aspecto como una posible mejora que podría introducirse al modelo en el futuro.

6.1 ESTABLECIMIENTO DEL PATRÓN

En las regiones bajo análisis (VII, VIII y IX) hay un universo de 29 estaciones evaporimétricas. Las estadísticas evaporimétricas adolecen del problema de que en general son cortas, porque las mediciones completas comienzan recién alrededor de 1985, salvo algunas excepciones. Los datos anteriores a esa fecha, incluso si cubren una gran cantidad de años, en general son datos diarios aislados, que no permiten reconstituir adecuadamente una estadística mensual.

De acuerdo con lo que se señala en el capítulo 3.5, se seleccionaron 8 estaciones evaporimétricas para ser usadas en la calibración, las que se presentan en la cobertura *evap1.shp*.

Para probar la consistencia de sus estadísticas, hubo que establecer un patrón. Por ello, se eligieron dentro de todas las estaciones, las que tenían las mejores estadísticas, es decir, las más largas y completas. Ellas son: Bullileo Embalse (Ene79-Dic06), Digua Embalse (Ene75-Dic06) y Parral (Ene75-Dic06). Los datos faltantes de la estación Bullileo Embalse en el periodo Ene75-Dic06, se rellenaron en base a los promedios mensuales de los datos efectivamente observados, ya que no se pudo lograr ninguna buena correlación con otra estación cercana y larga.

De este modo se calculó un patrón para el periodo Ene75-Dic06.

Luego, mediante un análisis de doble acumuladas invertido en el tiempo, (de 2006 a 1975), se verificó la consistencia de cada estación frente a la estación patrón y así se

validó el patrón. El análisis se efectuó invertido debido a que los años más antiguos son los más dudosos, y es más fácil corregirlos cuando están al final de la acumulación. Se puede mencionar que en forma general cada una de las estaciones se comportó bien en relación con el patrón, compensándose algunas desviaciones menores de las estaciones Bullileo Embalse y Parral.

El cálculo del patrón se presenta en el archivo 6.1 Análisis doble masa evap.xls, que se encuentra en el Anexo Digital.

6.2 RELLENO Y VERIFICACIÓN DE ESTADÍSTICAS

En el capítulo 3.5 se señala el período de cada estación evaporimétrica que se consideró apto para ser usado en la calibración. Para ese período se rellenó cada estación, teniendo en consideración lo siguiente:

No se pudo rellenar las series haciendo correlaciones entre estaciones, ya que las series de datos presentaban una gran dispersión, impidiendo el ajuste de líneas de regresión lineal aceptables a las nubes de puntos graficadas. Debido a ello, se realizó el relleno de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Cuando no estaba el dato total mensual, pero sí un dato de promedio diario para el mes, se calculó el total mensual multiplicando el valor medio diario por el número de días del mes. Luego se calculó para cada mes y para todo el período con observaciones, el máximo, el promedio y el mínimo de cada serie de datos observados. Finalmente se compararon los valores extremos observados (máximo y mínimo) con los valores calculados por multiplicación y se remplazaron los valores calculados, si estaban fuera del rango de valores observados, por el valor promedio de las observaciones.
- Cuando no estaba el dato total mensual ni el promedio diario para el mes, se rellenó con el valor del promedio de los valores observados para dicho mes a lo largo del período de vigencia de la estación.

De esta manera se logró un relleno aceptable de las estadísticas.

A continuación se procedió a verificar cada una de las 8 estaciones seleccionadas y rellenadas para calibración, contra el patrón, mediante un análisis de doble masa invertido (de 2006 hacia atrás en el tiempo). Por lo general, las estaciones comprobadas se comportaron bastante bien. Cabe mencionar que, en base a esta verificación, se corrigieron las siguientes estaciones:

- Contulmo (año 1997, donde se cambiaron valores anormalmente bajos por el valor promedio de los datos observados)
- Diguillín (se corrigió una leve desviación de los años más antiguos, con gran proporción de datos rellenados, en el período 1982-1975)
- Traiguén (se corrigió una leve desviación para los años más antiguos, con gran proporción de datos rellenados, en el período 1975-1988).

Así se obtuvieron estadísticas aptas para el cálculo de B, en las 8 estaciones requeridas para la calibración: Potrero Grande, Tutuvén Embalse, Liguay, Diguillín, Contulmo, Traiguén, El Vergel y Angol. Las estadísticas y su verificación con el patrón se encuentran en el archivo 6.1 Análisis doble masa evap.xls del Anexo Digital.

6.3 CÁLCULO DEL PARÁMETRO B

a) Cálculo de la evaporación media anual puntual

Para cada una de las 8 estadísticas rellenas y verificadas, asociadas a las 18 cuencas de calibración, se obtiene la evaporación media puntual para el período que pudo ser obtenido en cada caso. Este cálculo se realiza en la planilla 6.1 Análisis doble masa evap.xls, que se encuentra en el Anexo Digital, y el resumen de los valores calculados se presenta en el Cuadro N° 19 a continuación.

b) Cálculo de la evapotranspiración media areal sobre las cuencas

El dato de evapotranspiración media areal se obtuvo en base a la información de las curvas isoevapotranspiración del Balance Hídrico, disponible en forma de una cobertura Arcview (evapotranspiración.shp), y su intersección con las cuencas de calibración. La planilla de cálculo correspondiente se encuentra en el archivo Calculo B del Anexo Digital, y el resumen de los valores calculados se presenta en el Cuadro N° 19, adjunto.

c) Obtención del parámetro B

Con los datos de evaporación media por estación y evapotranspiración media por cuenca, la obtención de B es inmediata, y se presenta también en el Cuadro N° 19.

Cuadro N° 19
Obtención del parámetro B

Cuenca de calibración	Evaporación media puntual en mm	Evapotranspiración areal en mm	Parámetro B
Est. El Manzano antes junta Río Teno	895.3	600.0	0.67
Río Cato en Digua	1067.3	600.0	0.56
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	742.5	511.2	0.69
Río Diguillín en San Lorenzo	742.5	406.6	0.55
Río Purapel en Nirivilo	1383.8	600.0	0.43
Río Cauquenes El Arrayan	1166.0	600.0	0.51
Río Lirquén en Cerro El Padre	742.5	552.2	0.74
Río Malleco en Collipulli	742.5	442.3	0.60
Río Lonquén en Trehuaco	1166.0	600.0	0.51
Río Pingueral en Dichato	1117.0	600.0	0.54
Río Nicodahue en Pichún	1166.0	600.9	0.52
Río Andalien camino a Penco	633.6	600.0	0.95
Río Laraquete en el cajón	1166.0	600.0	0.51
Río Carampangue en Carampangue	1117.0	656.8	0.59
Río Lebu en Las Corrientes	1236.5	662.3	0.54
Río Caramávida en Caramávida	1236.5	682.3	0.55
Río Cayucupil en Cayucupil	1117.0	679.4	0.61
Río Butamal en Butamal	1236.5	683.7	0.55
Río Reputo en Reputo	974.5	600.0	0.62

CAPÍTULO 7**EVAPORACIÓN:
OBTENCIÓN DE FACTORES DE DISTRIBUCIÓN HORARIOS**

Para determinar los factores de distribución horaria de la evaporación diaria, se realizó una búsqueda de fuentes de datos, que se presenta en el capítulo 2.4, Revisión de antecedentes sobre evaporación horaria. La búsqueda dio por resultado, que hay datos de evaporación horaria para California, que son los que se han usado tradicionalmente para alimentar el modelo Sacramento, y en España, Murcia, donde en la Universidad de Cartagena se han desarrollado mediciones horarias de la evaporación para lograr su modelamiento en función de diversos parámetros meteorológicos.

En Chile no hay mediciones de evaporación horaria. Consultas específicas a la Universidad de Chile y de Talca, dieron resultados negativos. Por esta razón, aquí se exponen los factores resultantes de las investigaciones en el extranjero, con la recomendación de iniciar este tipo de medición en algunas regiones del país.

En el Cuadro N° 20 se presentan los valores de distribución horaria de California y Murcia. En Murcia se obtuvieron valores para cada estación del año. En el mismo cuadro se presenta la distribución propuesta, que consiste en una combinación lineal de las distribuciones de California y del verano (agosto) de Murcia, ésta última desplazada en tres horas hacia atrás, para adecuarse a las horas de luz del verano chileno.

En la Figura N° 19 se observan todas las distribuciones recopiladas, y en la Figura N° 20 está la distribución propuesta para el presente estudio, comparada con la distribución de California.

Figura N° 19
Distribución horaria de la evaporación. FD recopilados

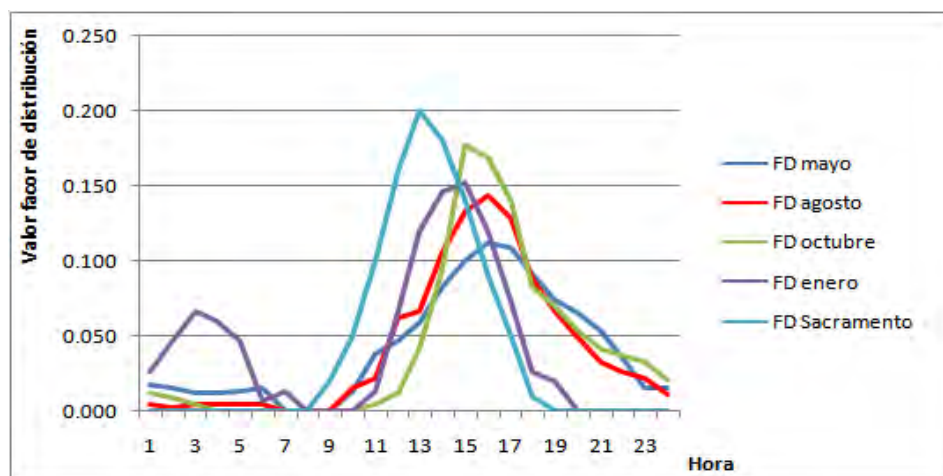
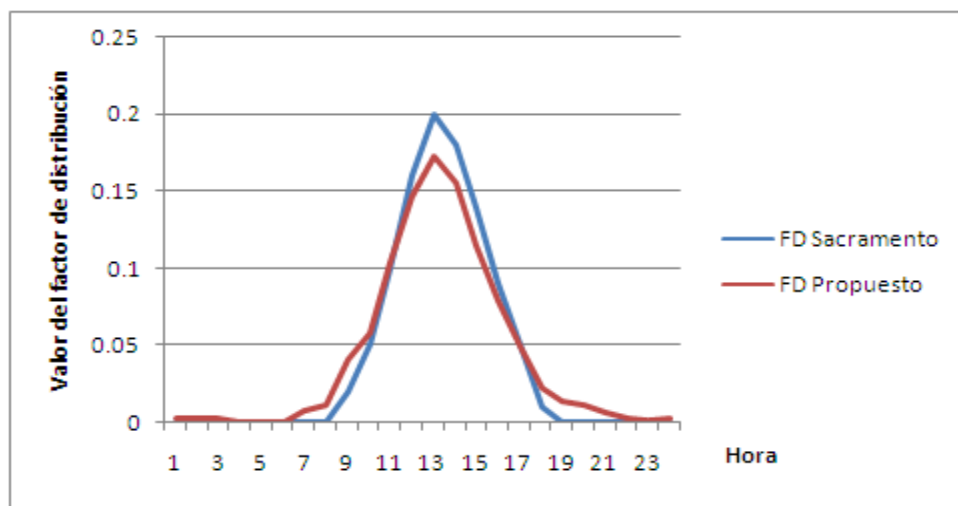


Figura N° 20
Factores de distribución horaria propuestos



Cuadro N° 20
Factores de distribución horarios para evaporación, recopilados y propuestos

Hora	España				California	Chile
	FD mayo	FD agosto	FD octubre	FD enero	FD Sacramento	FD Propuesto
1	0.018	0.004	0.012	0.026	0	0.002
2	0.015	0.002	0.008	0.046	0	0.002
3	0.012	0.004	0.004	0.066	0	0.002
4	0.012	0.004	0.000	0.060	0	0.000
5	0.013	0.004	0.000	0.046	0	0.000
6	0.015	0.004	0.000	0.007	0	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.013	0	0.008
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.011
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.02	0.041
10	0.013	0.016	0.000	0.000	0.05	0.058
11	0.039	0.022	0.004	0.013	0.1	0.103
12	0.047	0.062	0.012	0.066	0.16	0.147
13	0.059	0.067	0.041	0.119	0.2	0.172
14	0.083	0.106	0.095	0.146	0.18	0.154
15	0.101	0.133	0.177	0.152	0.14	0.114
16	0.113	0.144	0.169	0.119	0.09	0.078
17	0.110	0.129	0.140	0.073	0.05	0.049
18	0.092	0.089	0.082	0.026	0.01	0.022
19	0.074	0.067	0.070	0.020	0	0.013
20	0.065	0.049	0.053	0.000	0	0.011
21	0.053	0.033	0.041	0.000	0	0.006
22	0.036	0.027	0.037	0.000	0	0.002
23	0.015	0.022	0.033	0.000	0	0.001
24	0.015	0.011	0.021	0.000	0	0.002

CAPÍTULO 8

HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO

El modelo SIMED requiere para su funcionamiento, como dato de entrada, las ordenadas del hidrograma unitario de la cuenca.

Por ello fue necesario obtener, para cada una de las cuencas de calibración, su hidrograma unitario. Se trabajó con los hidrogramas unitarios sintéticos (HUS).

8.1 PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

La determinación del HUS de una cuenca se basa en sus parámetros geomorfológicos. Los parámetros requeridos son los siguientes:

- A = Área de la cuenca
- Cg = Ubicación del centroide de la cuenca
- Hmáx = Cota máxima
- Hg = Cota del centroide
- Hsal = Cota de salida
- L = Longitud del cauce principal en km
- Lg = Longitud del cauce desde el centroide de la cuenca hasta la salida
- Sum = Sumatoria de la longitud de las curvas de nivel, incluyendo la mitad de la más baja y la más alta de la cuenca
- h = Desnivel entre curvas de nivel
- S = Pendiente de Mociornita:

$$S = \frac{h \left(\frac{L_o}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} L_i + \frac{L_n}{2} \right)}{A}$$

Todos los parámetros requeridos se obtuvieron de las coberturas en Arcview facilitadas por la DGA. Dichos parámetros se calcularon en el archivo 8.1 HUS del Anexo Digital, y se presentan en el Cuadro N° 21 a continuación.

Se generaron, a su vez, dos coberturas nuevas, con los parámetros geomorfológicos espacialmente representables, que se entregan junto a este informe: centroides.shp y cauces.shp, ésta última con la información de L y Lg.

Cuadro N° 21
Parámetros geomorfológicos

Nombre Cuenca	area (has)	xcentroide	ycentroide	h max (m)	hsal (m)	h cent (m)	sumatoria curvas (m)	L (m)	lg (m)	Hm (m)	H (m)	h entre curvas (m)	A (m2)	S (o/1)
Estero El Manzano Antes Junta Río Teno	13330	332670	6134710	2500	525	1025	1252088	24374	13225	500	1975	50	133300699	0.4696
Río Purapel en Nirivilo	28861	211883	6064832	500	150	250	2507319	35090	18067	100	350	25	288611966	0.2172
Río Cauquenes en El Arrayan	62557	184684	5996780	600	150	300	4854540	51687	23679	150	450	25	625570470	0.1940
Río Lonquén en Trehuaco	109088	195581	5969748	375	25	200	5977235	92045	60507	175	350	25	1090877117	0.1370
Río Pingueral en Dichato	25201	162430	5939673	300	26	200	1650480	33800	23014	174	274	25	252007119	0.1637
Río Andalien Camino a Penco	74020	160328	5917598	451	25	151	5678514	57390	35853	126	426	25	740195587	0.1918
Río Niblinto antes Canal Alim.Emb. Coihueco	16162	270691	5931994	2275	310	925	2991554	35463	22166	615	1965	25	161615373	0.4628
Río Diguillin en San Lorenzo	19922	279145	5906734	2370	680	1000	4002197	29040	12655	320	1690	25	199222711	0.5022
Río Lirquén en Cerro El Padre	10152	248759	5811205	1401	351	551	607553	15717	4419	200	1050	50	101521208	0.2992
Río Malleco en Collipulli	41002	237063	5774576	1350	150	450	2335453	82146	50093	300	1200	50	410018891	0.2848
Río Laraquete en el Cajón	3877	133835	5877075	650	25	375	473140	14652	6637	350	625	25	38772974	0.3051
Río Lebu en Las Corrientes (en los Alamos)	71738	116788	5836292	1200	25	325	7515951	55051	28850	300	1175	25	717378276	0.2619
Río Nicodahue en Pichún	79199	157191	5828376	1175	75	425	8768562	58288	29620	350	1100	25	791986366	0.2768
Río Carampangue en Carampangue	120403	131955	5854998	1250	25	475	13456151	72477	33889	450	1225	25	1204030951	0.2794
Río Caramávida en Caramávida	14897	125888	5819131	1275	75	750	1958955	25711	12617	675	1200	25	148971882	0.3287
Río Cayucupil en Cayucupil	16873	135793	5813113	1075	40	650	1993607	28113	15448	610	1035	25	168730673	0.2954
Río Butamalal en Butamalal	11443	136526	5805688	1375	60	650	1335962	24653	12694	590	1315	25	114425703	0.2919
Río Reputo en Reputo	1430	120917	5802312	550	65	175	195362	6460	2314	110	485	25	14299116	0.3416

8.2 PARÁMETROS DEL HUS

Para el cálculo de los parámetros propios del HUS se usaron las relaciones aplicables a cuencas chilenas ubicadas en la zona central y sur, con áreas comprendidas entre 80 y 4500 km². hidrogramas unitarios sintéticos actualizados de Ayala (2002), contenidos en el Manual de Carreteras. Las fórmulas correspondientes son las siguientes:

Zona I Aconcagua Maule:

$$t_p = 0.386 * \left(\frac{L * L_g}{\sqrt{S}} \right)^{0.397}$$

$$q_p = 355 * t_p^{-1.220}$$

$$B = 2.70 * t_p^{1.104} [hrs]$$

Zona II: Itata-Chamiza:

$$t_p = 1.315 * \left(\frac{L * L_g}{\sqrt{S}} \right)^{0.241}$$

$$q_p = 171.3 * t_p^{-0.829}$$

$$B = 5.45 * t_p^{1.104} [hrs]$$

Donde:

t_p = Tiempo de retraso de la cuenca o tiempo al peak en horas, es el lapso transcurrido entre el centroide de la lluvia y el tiempo para el cual se produce el máximo del hidrograma

q_p = Caudal al peak por km² y por mm de agua caída (l/s/km²/mm)

B = Tiempo base del hidrograma (horas)

En ambos casos, zona central y sur, las relaciones son válidas para lluvias de duración igual a 0.18 veces el tiempo de retraso de la cuenca, es decir, lluvias de duración igual a

$$t_u = \frac{t_p}{5.5} [hrs]$$

Para otras duraciones de la lluvia, el tiempo de retraso se corrige, agregándole un cuarto de la diferencia entre la nueva duración de la lluvia y la anteriormente calculada. Este tiempo de retraso corregido se usa para calcular los valores máximos y la base del hidrograma. El tiempo de retraso modificado está dado por:

$$t_{pm} = t_p + 0.25 * (1 - tu) [hrs]$$

En el Cuadro N° 22 se presentan los valores adoptados para los parámetros utilizados en la determinación del hidrograma unitario sintético de cada cuenca. El detalle de los cálculos se encuentra en el archivo 8.1 HUS del Anexo Digital.

Cuadro N° 22
Parámetros para el HUS

Cuenca N°	Zona Aconcagua-Maule	$tp=0.386(L^*lg/s^{0.5})^{0.397}$ horas	$tu = tp/5.5$ horas	$tpm = tp + (1-tu)/4$ horas	$qp=355 * tp^{1.22}$ l/s/km2/mm	$B=2.7 * tp^{1.104}$ hoas	tu adoptado horas
1	Estero El Manzano Antes Junta Río Teno	4.44	0.81	4.49	56.82	14.17	1
2	Río Purapel en Nirivilo	6.77	1.23	6.71	34.78	22.09	1
3	Río Cauquenes en El Arrayan	8.99	1.63	8.83	24.89	29.91	1
	Zona Itata-Chamiza	$tp=1.315(L^*lg/s^{0.5})^{0.241}$	$tu = tp/5.5$	$tpm = tp + (1-tu)/4$	$qp=171.3tp^{0.829}$	$B=5.45tp^{0.714}$	tu adoptado
4	Río Lonquén en Trehuaco	13.36	2.43	13.36	19.98	34.69	2
5	Río Pingueral en Dichato	8.13	1.48	8.01	30.51	24.09	1
6	Río Andalien Camino a Penco	10.09	1.83	9.88	25.65	27.97	1
7	Río Niblinto antes Canal Alim. Emb. Coihueco	7.20	1.31	7.12	33.66	22.13	1
8	Río Diguillin en San Lorenzo	5.93	1.08	5.93	39.15	19.43	1
9	Río Lirquén en Cerro El Padre	4.23	0.77	4.28	51.28	15.40	1
10	Río Malleco en Collipulli	11.37	2.07	11.37	22.83	30.92	2
11	Río Laraquete en el Cajón	4.57	0.83	4.61	48.22	16.24	1
12	Río Lebu en Las Corrientes (en los Alamos)	9.13	1.66	8.96	27.80	26.09	1
13	Río Nicodahue en Pichún	9.25	1.68	9.08	27.50	26.34	1
14	Río Carampangue en Carampangue	10.06	1.83	9.86	25.70	27.92	1
15	Río Caramávida en Caramávida	6.06	1.10	6.06	38.48	19.72	1
16	Río Cayucupil en Cayucupil	6.58	1.20	6.53	36.14	20.82	1
17	Río Butamalal en Butamalal	6.09	1.11	6.09	38.30	19.80	1
18	Río Reputo en Reputo	2.87	0.52	2.87	71.43	11.58	0.5

Es necesario hacer notar dos aspectos relacionados con la aplicación del HUS en la modelación de las cuencas:

En primer lugar, todas las cuencas seleccionadas se encuentran en el rango de aplicación del concepto del hidrograma unitario sintético. De acuerdo con los estudios realizados en Chile, el concepto del hidrograma unitario sintético tiene validez en cuencas con áreas entre 10 y 4500 km², sin lagos o embalses que pudieran alterar significativamente la onda de crecida, y con un solo cauce principal. Las cuencas seleccionadas cumplen con estas condiciones.

En segundo lugar, hay algunas cuencas que tienen tiempos unitarios diferentes de 1 hora. Son las cuencas Lonquén en Trehuaco y Malleco en Collipulli, con tiempos unitarios de alrededor de 2 horas, y Reputo en Reputo, con un tiempo unitario de 0,5 horas. En estos casos, se aplicó el hidrograma en S para obtener el HUS correspondiente a 1 hora. Sin embargo, para las estaciones Malleco y Lonquén el hidrograma en S se desestabilizó, lo que puede ocurrir. En esos casos, se procedió a aplicar una fórmula de corrección del tiempo unitario, de modo que al final siempre fue posible obtener los HUS de 1 mm y 1 hora.

La planilla de cálculo de estos hidrogramas se encuentra en el Anexo 8.1.HUS.

8.3 ORDENADAS DEL HUS

Para generar las ordenadas del hidrograma unitario a partir de los parámetros calculados, se han utilizado los coeficientes de distribución de Linslay, sugeridos en el Manual de Crecidas de la DGA (Agosto 1995), que son los siguientes:

Cuadro N° 23
Coeficientes de distribución para el HUS

t / t _p razón	q / q _p razón
0.00	0.00
0.30	0.20
0.50	0.40
0.60	0.60
0.75	0.80
1.00	1.00
1.30	0.80
1.50	0.60
1.80	0.40
2.30	0.20
2.70	0.10
3.75	0.00

Con ellos se obtienen los hidrogramas unitarios t, q (tiempo versus caudal unitario específico, l/s/km²/mm) que se entregan en el archivo 8.1 HUS del Anexo Digital.

Como la mayoría de los hidrogramas son adaptados a otros tiempos de lluvia diferentes del tiempo unitario, es necesario verificar que el área bajo la curva (q, t) siga correspondiendo al volumen unitario. Para ello se efectuó la integral sobre esta área, se calculó el volumen bajo la curva, y se corrigieron las ordenadas q en forma proporcional a la diferencia de volumen que resulta con respecto al volumen unitario. De esta manera se obtuvo el hidrograma unitario t, q corregido. La coordenada q corregido se entrega en cada caso, en el mismo archivo 8.1 HUS.

Por último, se tiene que $Q(t) = q(t) * A$ corresponde al caudal unitario generado en el área total de cada cuenca (m³/s/mm). Los datos de Q son los que el modelo SIMED requiere para operar. Para cada cuenca, estos datos se entregan también en el archivo 8.1 HUS, con el gráfico correspondiente al hidrograma resultante.

CAPÍTULO 9 **OBTENCIÓN DEL PARÁMETRO K DE EMBALSE**

9.1 FUNDAMENTO TEÓRICO

El modelo SIMED asume que el suelo que recibe las precipitaciones, se comporta como un embalse lineal. La contribución al caudal total del río la aporta el vaciado de este suelo, y, según la hipótesis de embalse lineal, el caudal entregado por dicho embalse en todo momento es proporcional a su volumen remanente. La constante de proporcionalidad se llama K, siendo:

$$V = K \cdot Q \quad (9.1)$$

donde:

V es el volumen de agua almacenado en el suelo
K es la constante de embalse del suelo con comportamiento lineal
Q es el caudal entregado al río por el suelo o embalse subterráneo

De acuerdo con la teoría desarrollada en los informes SIT 91, 93 y 110, este caudal disminuye de forma exponencial con el tiempo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\ln(Q(t) - P_p) + \frac{t}{K} = \ln(Q(t_0) - P_p) + \frac{t_0}{K} \quad (9.2)$$

de donde se obtiene K de la siguiente forma:

$$K = \frac{t - t_0}{\ln\left(\frac{Q_0 - P_p}{Q_t - P_p}\right)} \quad (9.3)$$

donde:

Q_t el caudal observado en el río en un instante t dado
 Q_0 el caudal observado en el río en el instante $t=0$
 P_p la percolación profunda

En periodo de estiaje, no hay escorrentía directa, de modo que la escorrentía superficial corresponde al caudal que entrega el suelo. Si además se supone que la percolación profunda se anula, lo que ocurre en un periodo de sequía relativa o alejándose de las lluvias, el caudal observado en el río corresponde al total del caudal entregado por el embalse lineal $Q(t)$.

Con esto, la ecuación (9.3) se simplifica, y se obtiene K de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{t - t_0}{\ln\left(\frac{Q(t_0)}{Q(t)}\right)} \quad (9.4)$$

Graficándose dicha relación para distintos tiempos t adecuados, alejados de lluvias, en que sea válida la asunción de percolación profunda nula, se obtiene una recta de acuerdo con lo siguiente:

$$\ln(Q) = m \cdot t + n \quad (9.5)$$

donde la pendiente m corresponde al siguiente valor:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{Q}{Q_0}\right)}{t_0 - t} \quad (9.6)$$

Se puede observar que m corresponde justamente a -1/K, de modo que la forma de obtener K es graficando el logaritmo natural del caudal en función del tiempo en períodos de estiaje, y calculando la pendiente de la recta.

Cabe hacer notar que no hay diferencia entre usar, para este gráfico, valores instantáneos de caudal, o valores promedios diarios. La única precaución que hay que tener es encontrar un período de estadística en que se cumplan las suposiciones hechas para aplicar el concepto expuesto.

9.2 CÁLCULO DEL PARÁMETRO K

Para cada cuenca estudiada, se usaron los Gráficos Q-P antes realizados y presentados en el Anexo Digital. En estos gráficos, se asocian los caudales diarios de la estación fluviométrica con las precipitaciones caídas en varias estaciones pluviométricas/gráficas cercanas. A partir de ellos se identificaron los diferentes períodos de estiaje y/o periodos sin lluvia, y se eligieron periodos alejados por lo menos por 2 semanas de la última lluvia, para acercarse lo más posible de la condición de percolación nula.

Una vez elegido el periodo, se gráfico la relación previamente detallada del logaritmo natural del caudal en función del tiempo, y se estimó el mejor ajuste por regresión lineal. Luego se calculó el valor del parámetro K para cada periodo. El detalle del cálculo se encuentra en el archivo 9.2 Cálculo K del Anexo Digital.

Para cada cuenca se obtuvieron entre 3 y 6 valores del parámetro K. Para definir el valor a adoptar, se evaluó visualmente la bondad del ajuste, y se clasificó según cuatro categorías: excelente, buena, regular y mala. A cada categoría se le asignó, respectivamente, los valores 1,00; 0,75; 0,50 y 0,25. También se determinó el número de días que abarcaba la regresión lineal.

En base a estos dos parámetros, se asignó un peso a cada uno de los valores de K calculado, dando más importancia a regresiones largas y de mejor ajuste. El peso se calculó como el producto de ambos parámetros.

Finalmente se estimó un valor K para cada cuenca calculando un promedio de los valores calculados, ponderado por los pesos respectivos.

Dicho análisis se encuentra en el siguiente Cuadro N° 25 y el resumen de los valores de K adoptados se encuentra en el Cuadro N° 24.

Cuadro N° 24
Valores de K adoptados

Estación fluviométrica / Cuenca	K horas
Est. El Manzano antes junta Río Teno	840
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	660
Río Diguillín en San Lorenzo	2460
Río Purapel en Nirivilo	740
Río Cauquenes El Arrayan	810

Estación fluviométrica / Cuenca	K horas
Río Lirquén en Cerro El Padre	660
Río Malleco en Collipulli	890
Río Lonquén en Trehuaco	980
Río Pingueral en Dichato	1420
Río Nicodahue en Pichún	1360
Río Andalien camino a Penco	1880
Río Laraquete en el cajón	2780
Río Carampangue en Carampangue	2040
Río Lebu en Las Corrientes	1660
Río Caramávida en Caramávida	1470
Río Cayucupil en Cayucupil	1720
Río Butamal en Butamal	1670
Río Reputo en Reputo	890

Cuadro N° 25

Detalle del análisis para obtención del parámetro K

Estación fluviométrica / Cuenca	Periodo cálculo			Calidad regresión	Peso	K calculad	K adopt
	Principio	Término	(días)			(h)	(h)
Est. El Manzano antes junta Río Teno	15-Nov-61	28-Feb-62	106	BUENA	0.40	757	840
	05-Dic-78	23-Ene-79	43	REGULAR	0.11	1398	
	15-Nov-82	15-Ene-83	50	MALA	0.06	399	
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	06-Ene-80	07-Feb-80	33	REGULAR	0.08	526	660
	01-Dic-85	07-Ene-86	38	EXCELENTE	0.19	598	
	15-Dic-86	15-Feb-87	63	EXCELENTE	0.31	638	
	02-Dic-90	11-Ene-91	41	BUENA	0.15	741	
	18-Dic-93	15-Ene-94	29	EXCELENTE	0.14	767	
Río Diguillín en San Lorenzo	27-Dic-57	06-Mar-58	48	EXCELENTE	0.18	1624	2460
	13-Ene-78	25-Feb-78	44	EXCELENTE	0.16	1641	
	27-Dic-85	12-Feb-86	48	BUENA	0.13	2599	
	01-Ene-87	23-Mar-87	82	REGULAR	0.15	3653	
	25-Dic-01	25-Feb-02	51	BUENA	0.14	3063	
Río Purapel en Nirivilo	17-Nov-72	21-Dic-72	21	EXCELENTE	0.15	739	740
	10-Nov-82	22-Nov-82	43	BUENA	0.23	958	
	15-Nov-84	13-Feb-85	44	BUENA	0.23	962	
	21-Sep-99	23-Oct-99	33	EXCELENTE	0.23	290	
Río Cauquenes El Arrayan	15-Oct-81	15-Ene-82	93	BUENA	0.24	967	810
	01-Nov-83	16-Dic-83	36	EXCELENTE	0.13	733	
	25-Nov-84	02-Ene-85	24	EXCELENTE	0.08	804	
	15-Nov-87	20-Dic-87	31	EXCELENTE	0.11	811	
	01-Dic-97	03-Feb-98	44	EXCELENTE	0.15	769	
Estación fluviométrica / Cuenca	Periodo cálculo			Calidad	Peso	K calculad	K adopt

	Principio	Término	(días)	regresión		(h)	(h)
	01-Oct-99	29-Nov-00	60	BUENA	0.16	666	
Río Lirquén en Cerro El Padre	11-Dic-44	08-Ene-45	29	EXCELENTE	0.15	616	660
	01-Oct-55	01-Dic-55	48	REGULAR	0.12	829	
	24-Dic-65	14-Ene-65	22	BUENA	0.08	453	
	26-Dic-79	04-Feb-80	41	BUENA	0.15	654	
	17-Nov-81	15-Dic-81	29	BUENA	0.11	724	
	12-Dic-82	11-Ene-83	31	EXCELENTE	0.16	662	
Río Malleco en Collipulli	26-dic-79	22-ene-80	12	BUENA	0.08	605	890
	12-dic-82	12-ene-83	32	EXCELENTE	0.30	715	
	4-dic-85	9-ene-87	25	REGULAR	0.12	1183	
	25-dic-86	31-ene-87	38	EXCELENTE	0.36	1005	
Río Lonquén en Trehuaco	18-dic-86	4-feb-87	44	BUENA	0.33	972	980
	21-nov-87	17-dic-87	27	BUENA	0.20	1044	
	2-nov-95	30-nov-95	28	BUENA	0.21	942	
Río Pingueral en Dichato	24-nov-85	18-dic-85	25	REGULAR	0.20	1838	1420
	11-dic-86	28-dic-86	19	REGULAR	0.16	979	
	21-nov-87	7-dic-87	17	MALA	0.07	1207	
Río Nicodahue en Pichún	23-dic-90	18-ene-91	19	REGULAR	0.16	1501	1360
	28-nov-00	13-dic-00	16	REGULAR	0.14	1244	
	8-dic-01	31-dic-01	24	REGULAR	0.20	1323	
Río Andalien camino a Penco	21-ene-62	21-feb-62	32	BUENA	0.16	2272	1880
	24-nov-85	10-ene-86	32	REGULAR	0.11	1525	
	22-nov-87	16-ene-88	52	BUENA	0.27	1707	
	7-dic-01	6-ene-02	31	EXCELENTE	0.21	1980	
Río Laraquete en el cajón	24-dic-86	22-mar-87	90	BUENA	0.30	2841	2780
	17-dic-93	12-feb-96	55	BUENA	0.18	3339	
	1-dic-95	18-dic-96	80	BUENA	0.27	2324	
Río Carampangue en Carampangue	2-ene-78	23-ene-78	53	BUENA	0.37	2275	2040
	16-nov-81	10-dic-81	23	MALA	0.05	2619	
	12-dic-82	12-ene-83	32	EXCELENTE	0.30	1651	
Río Lebu en Las Corrientes	12-ene-69	7-feb-69	27	REGULAR	0.16	1250	1660
	1-mar-71	26-mar-71	23	REGULAR	0.14	3490	
	3-nov-83	29-dic-83	34	EXCELENTE	0.40	1205	
Río Caramávida en Caramávida	24-dic-65	27-ene-66	34	EXCELENTE	0.20	1169	1470
	1-nov-83	28-dic-83	58	BUENA	0.25	1665	
	30-nov-91	10-ene-86	42	BUENA	0.18	1790	
	30-dic-86	20-ene-87	21	BUENA	0.09	1042	
	29-oct-91	16-nov-91	18	REGULAR	0.05	1299	
Río Cayucupil en Cayucupil	4-ene-66	17-feb-66	35	REGULAR	0.21	1855	1720
	12-ene-68	2-feb-68	22	REGULAR	0.13	1011	
	28-ene-76	22-feb-76	26	BUENA	0.23	1991	
Río Butamal en Butamal	24-dic-65	23-feb-66	24	BUENA	0.12	1080	1670
	10-dic-82	19-ene-83	15	BUENA	0.08	1082	
	1-nov-83	29-dic-83	59	EXCELENTE	0.40	1797	
	21-dic-85	9-ene-86	20	REGULAR	0.07	2247	
	30-dic-86	6-feb-87	30	BUENA	0.15	1859	
Río Reputo en Reputo	5-ene-65	27-feb-65	23	REGULAR	0.11	500	890
	10-dic-82	19-ene-83	40	MALA	0.09	1200	
	1-nov-83	16-dic-83	46	REGULAR	0.21	953	

CAPÍTULO 10 METODOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE PARÁMETROS SEGÚN TÉRMINOS DE REFERENCIA

-

Todos los demás parámetros de suelo, que son Khid, Smin, Scrit, Scc, Hcap, Hsuelo, se obtuvieron, en una primera instancia, a partir de la metodología que se explica sucintamente en el presente capítulo.

Los capítulos que contienen el detalle de esta metodología, y todo el trabajo realizado a partir de ella, se encuentran en el Anexo 10.0 Metodología Detalle Parámetros.

El hecho de que aquí sólo se presente un resumen de ella, se debe a que, como resultado del presente estudio, se detectó que es otra la metodología más adecuada para generar los valores iniciales de los parámetros de calibración del modelo SIMED. Dicha nueva metodología se explica en el Capítulo 12.4.

10.1 CONDUCTIVIDAD VERTICAL K hid

La metodología sugerida en los Términos de Referencia, comienza con la determinación de un valor de Khid, el cual representa lo que ocurre en la cuenca. El valor de Khid se obtiene a partir de las estadísticas de caudales horarios en la estación de control, en momentos de recesión después de lluvias que generan grandes crecidas, y antes de nuevas lluvias para evitar ruido en la señal, bajo el concepto de que Khid corresponde a la percolación profunda máxima, y ocurre cuando el suelo está saturado.

Para obtener el valor de Khid, se graficaron las estadísticas horarias de las crecidas seleccionadas y sus recesiones, en un gráfico semi-logarítmico $\ln(Q)=f(t)$, se ubicó el punto de inflexión de la curva de recesión y se buscó el mejor ajuste lineal para la recesión después del punto de inflexión. De acuerdo con la hipótesis de embalse lineal, en este tipo de gráfico la recesión presenta un comportamiento lineal, lo que facilita la identificación del punto de inflexión en la rama recesiva del hidrograma.

Este proceder se aplicó para varias recesiones en cada estación, de modo que el valor de Khid se obtuvo finalmente como promedio de estos valores, ponderados por la calidad del ajuste de la recta y grado de cumplimiento presumible de la condición de percolación constante. Los valores se encuentran en el Cuadro N° 26 adjunto. Cabe señalar que los valores individuales son, en general, bastante disímiles entre ellos, pudiendo variar, para una misma estación, hasta en un factor 7.

Cuadro N° 26
Valores adoptados de Khid, en mm/h y en in/h

Estación fluviométrica / Cuenca	Khid	
	(mm/h)	(in/h)
Est. El Manzano antes junta Río Teno	7,8	0,31
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	7,3	0,29
Río Diguillín en San Lorenzo	19,2	0,76
Río Purapel en Nirivilo	4,1	0,16
Río Cauquenes El Arrayan	2,0	0,08
Río Lirquén en Cerro El Padre	7,5	0,30
Río Malleco en Collipulli	5,4	0,21
Río Lonquén en Trehuaco	0,6	0,02
Río Pingueral en Dichato	0,6	0,02
Río Nicodahue en Pichún	2,1	0,08
Río Andalien camino a Penco	1,8	0,07
Río Laraquete en el cajón	6,0	0,24
Río Carampangue en Carampangue	1,4	0,05
Río Lebu en Las Corrientes	0,9	0,04
Río Caramávida en Caramávida	3,2	0,12
Río Cayucupil en Cayucupil	2,5	0,10
Río Butamalal en Butamalal	0,5	0,02
Río Reputo en Reputo	1,6	0,06

10.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SUELO

Los parámetros de suelo que necesita el modelo SIMED para operar, son los siguientes:

- a) Porosidad total del suelo, PorTot
- b) Porosidad efectiva del suelo, PorEf
- c) Altura de agua capilar o de ascenso capilar, Hcap
- d) Humedad correspondiente a la capacidad de campo, Scc
- e) Humedad correspondiente al punto de marchitez permanente, Smin
- f) Grado de humedad crítico, Scrit
- g) Altura de agua correspondiente a la capacidad de campo, Hcc
- h) Altura máxima de agua, hmax
- i) Profundidad del suelo, hsuelo

La metodología utilizada para determinar estos parámetros se basó en la ponencia “Método para la determinación de los valores iniciales de los parámetros del modelo SIMED”, presentada por Miguel Ángel Caro en el XVII Congreso Chileno de Hidráulica, además de los estudios SIT 110 y SIT 93.

Los parámetros PorTot, PorEf y Hcap se determinan en función del parámetro Khid, previamente calculado, utilizando el Cuadro N° 27. Dicho cuadro corresponde a la tabla 4.3.1 que se encuentra en la p. 117 del libro “Hidrología Aplicada, V.T. Chow, 1994” y presenta los parámetros de infiltración de Green-Ampt para diferentes clases de suelo.

Los parámetros Scc y Smin se obtienen a partir del método del triángulo de texturas de suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos, programado para Windows, denominado “Soil Water Characteristics from Texture”, que se muestra en la Figura N° 21. Este método fue desarrollado a partir del artículo escrito por Saxton et al (1985).

A modo de ilustración, en la pantalla de la Figura N° 21 se muestra cómo a cada punto (suelo) se asocia una textura, un valor de Khid, de PorTot, de Smin y de Scc. Los valores de estos parámetros varían en función del contenido de materia orgánica, salinidad, contenido de grava y compacidad del suelo.

Finalmente, los valores de Scrit se obtienen por cálculo a partir de Scc y Smin:

$$Scrit = Scc - 0,60 (Scc - Smin) = 0,4 Scc + 0,6 Smin$$

Nota: Los valores de los parámetros entregados por el programa de suelos están referidos al volumen total de suelo, por lo que deben ser divididos por el porcentaje de saturación para convertirlos en grado de saturación. El valor de la conductividad hidráulica Khid está dado en in/h, por lo que hay que hacer la conversión a cm/h multiplicando por 2,54.

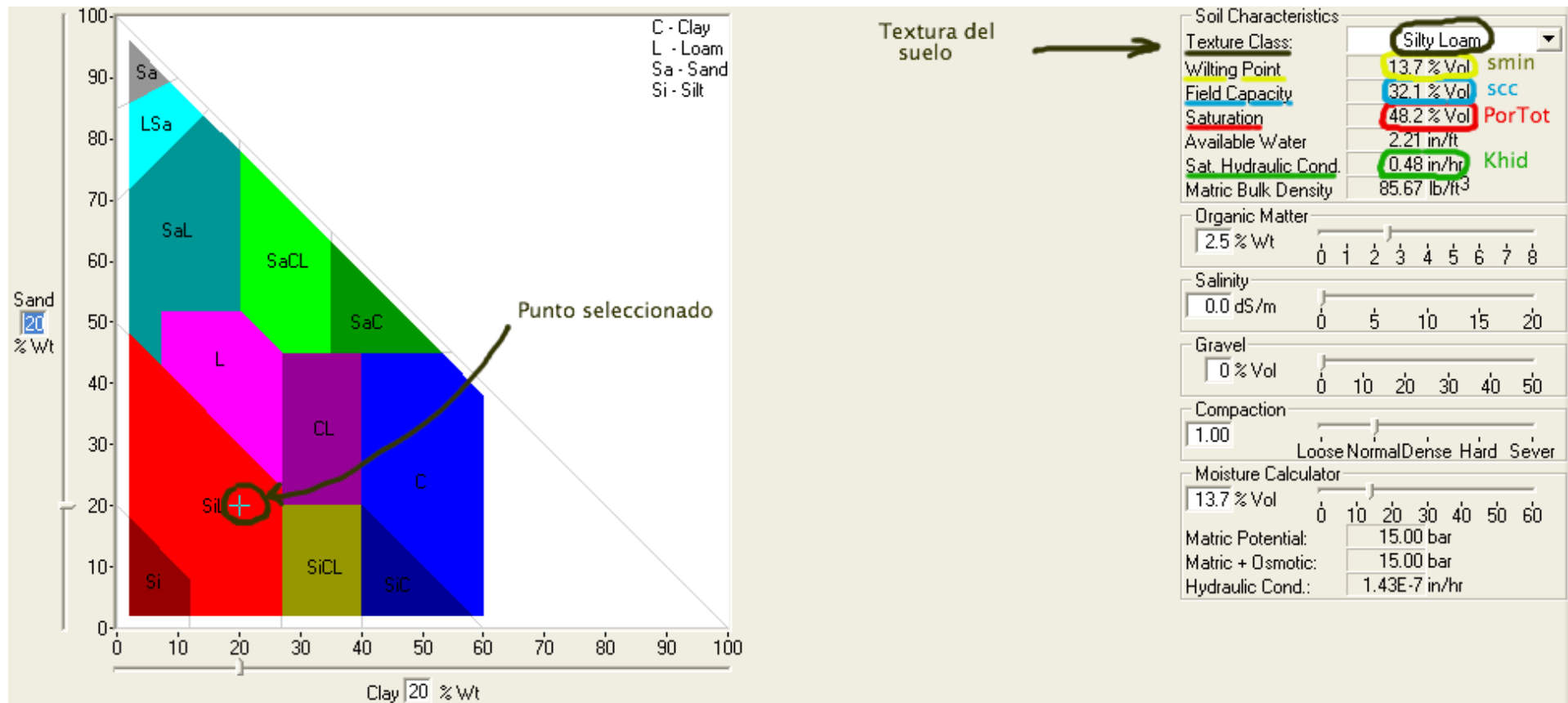
Cuadro N° 27
Determinación de parámetros del suelo en función de la conductividad Khid

TABLA 4.3.1
Parámetros de infiltración de Green-Ampt para varias clases de suelos

Clase de suelo	Porosidad η	Porosidad efectiva θ_e	Cabeza de succión del suelo en el frente de mojado ψ (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/h)
Arena	0.437 (0.374–0.500)	0.417 (0.354–0.480)	4.95 (0.97–25.36)	11.78
Arena margosa	0.437 (0.363–0.506)	0.401 (0.329–0.473)	6.13 (1.35–27.94)	2.99
Marga arenosa	0.453 (0.351–0.555)	0.412 (0.283–0.541)	11.01 (2.67–45.47)	1.09
Marga	0.463 (0.375–0.551)	0.434 (0.334–0.534)	8.89 (1.33–59.38)	0.34
Marga limosa	0.501 (0.420–0.582)	0.486 (0.394–0.578)	16.68 (2.92–95.39)	0.65
Marga arenoarcillosa	0.398 (0.332–0.464)	0.330 (0.235–0.425)	21.85 (4.42–108.0)	0.15
Marga arcillosa	0.464 (0.409–0.519)	0.309 (0.279–0.501)	20.88 (4.79–91.10)	0.10
Marga limo–arcillosa	0.471 (0.418–0.524)	0.432 (0.347–0.517)	27.30 (5.67–131.50)	0.10
Arcilla arenosa	0.430 (0.370–0.490)	0.321 (0.207–0.435)	23.90 (4.08–140.2)	0.06
Arcilla limosa	0.479 (0.425–0.533)	0.423 (0.334–0.512)	29.22 (6.13–139.4)	0.05
Arcilla	0.475 (0.427–0.523)	0.385 (0.269–0.501)	31.63 (6.39–156.5)	0.03

Los números entre paréntesis debajo de cada parámetro son una desviación estándar alrededor del valor del parámetro dado. Fuente: Rawls, Brakensiek y Miller, 1983.

Figura N° 21
Pantalla del programa Soil Water Characteristics From Texture



El parámetro Hcc es la capacidad de campo, expresada como altura de agua. En esta metodología, se asume que Hcc corresponde a la cantidad de lluvia que puede absorber un suelo seco antes de que se inicie la escorrentía superficial. Por lo tanto, Hcc puede estimarse, con limitaciones, a partir de la suma de las precipitaciones anteriores al aumento brusco del hidrograma de caudales, en lo posible horarios.

Los resultados obtenidos para Hcc se presentan en el Cuadro N° 28. El detalle del cálculo para cada una de las cuencas se entrega en el Anexo Digital 10.

Cuadro N° 28
Resultados del parámetro Hcc

Estación fluviométrica / Cuenca	hcc
	(cm)
Est. El Manzano antes junta Río Teno	7
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	5
Río Diguillín en San Lorenzo	8
Río Purapel en Nirivilo	5
Río Cauquenes El Arrayan	5
Río Lirquén en Cerro El Padre	10
Río Malleco en Collipulli	9
Río Lonquén en Trehuaco	4
Río Pingüeral en Dichato	5
Río Nicodahue en Pichún	4
Río Andalien camino a Penco	3
Río Laraquete en el Cajón	3
Estación fluviométrica / Cuenca	hcc
	(cm)
Río Carampangue en Carampangue	5
Río Lebu en Las Corrientes	6
Río Caramávida en Caramávida	4
Río Cayucupil en Cayucupil	5
Río Butamalal en Butamalal	3
Río Reputo en Reputo	5

Los parámetros Hmax y Hsuelo se obtienen por cálculo a partir de Hcc, Scc y PorTot:

$$H_{max} = \frac{H_{cc}}{S_{cc}}$$

$$H_{suelo} = \frac{H_{max}}{PorTot}$$

Los valores finalmente obtenidos para los parámetros presentados, son los que se muestran en el Cuadro N° 29 adjunto.

Cuadro N° 29
Resumen de resultados para los parámetros iniciales de suelo

Estación fluviométrica / Cuenca	PorEf	hcap	Sec	Scrit	Smin	hsuelo
		(mm)				(mm)
Est. El Manzano antes junta Río Teno	0.460	160	0.714	0.505	0.365	200
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	0.470	160	0.714	0.505	0.365	143
Río Diguillín en San Lorenzo	0.400	80	0.545	0.404	0.309	333
Río Purapel en Nirivilo	0.450	100	0.750	0.575	0.458	139
Río Cauquenes El Arrayan	0.360	170	0.786	0.645	0.551	150
Río Lirquén en Cerro El Padre	0.470	160	0.714	0.505	0.365	286
Río Malleco en Collipulli	0.485	160	0.746	0.555	0.428	241
Río Lonquén en Trehuaco	0.320	240	0.870	0.719	0.618	105
Río Pingueral en Dichato	0.320	240	0.870	0.719	0.618	132
Río Nicodahue en Pichún	0.360	170	0.786	0.645	0.551	120
Río Andalien camino a Penco	0.350	200	0.786	0.645	0.551	90
Río Laraquete en el cajón	0.485	160	0.736	0.538	0.406	82
Río Carampangue en Carampangue	0.330	220	0.814	0.667	0.569	143
Río Lebu en Las Corrientes	0.420	290	0.848	0.695	0.594	147
Río Caramávida en Caramávida	0.430	90	0.765	0.606	0.500	114
Río Cayucupil en Cayucupil	0.400	60	0.768	0.618	0.518	148
Río Butamalal en Butamalal	0.320	240	0.870	0.719	0.618	79
Río Reputo en Reputo	0.340	200	0.800	0.657	0.561	147

CAPÍTULO 11**CALIBRACION Y VALIDACION
EN CUENCAS SELECCIONADAS**

En el Anexo Digital llamado 11.0 Anexo Modelo, se incluye un manual de uso detallado para el modelo SIMED, obtenido de la experiencia desarrollada en el presente estudio. También se incluye un listado de problemas encontrados al operar el modelo, y las sugerencias correspondientes para superarlos.

11.1 GENERACIÓN DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA

La determinación de los valores iniciales de los parámetros de calibración, presentada en los capítulos anteriores, permite generar los archivos de calibración que el modelo necesita para operar.

Cabe mencionar aquí que es importante conservar el formato exacto de estos archivos, ya que el modelo no tiene la capacidad de identificar los datos si hay cambios. Ejemplos de dichos archivos se encuentran al final del informe del estudio SIT 91, de Pablo Isensee Martinez.

En el presente estudio, todos los archivos de calibración y de validación fueron generados en el archivo Elab Arch Calib.xls que permite darle el formato necesario a los datos. Dicho archivo se entrega en el Anexo Digital 11.1.

Los archivos de cada cuenca contienen los siguientes datos, según su respectiva extensión, como se muestra en el Cuadro N° 30.

Cuadro N° 30
Archivos de calibración, extensiones y tipo de datos que contienen

Extensión	Tipo de datos contenidos
.dat	Caracterización de la cuenca: identificación y valores de los parámetros, identificación y ubicación de los archivos de datos
.dye	Factores de distribución horarios de los 3 tipos de lluvias modeladas y de la evaporación
.duh	Coeficientes del hidrograma unitario de la cuenca
.evm	Estadística mensual de evaporación
.yud	Estadística diaria de precipitaciones
.qdo	Estadística diaria de caudales observados

Los archivos .dat, .dye, y .duh. son los mismos para los periodos de calibración y validación, mientras que los archivos .evm, .yud, y .qdo se deben generar respectivamente para cada uno de los periodos de calibración y de validación. Para elegir los periodos de calibración / validación de las estadísticas disponibles, se procedió de la siguiente manera.

De toda la estadística disponible para cada estación, se definieron los periodos de calibración y validación según los siguientes criterios:

- período de calibración de 4 años seguidos como mínimo
- estadística de precipitaciones completa o con muy poco relleno
- periodo de calibración que contenga años extremos (secos y húmedos)

Como resultado se obtuvieron los siguientes periodos de calibración y validación del Cuadro N° 31.

Cuadro N° 31
Definición de periodos de calibración y validación y años extremos

Estación fluviométrica / Cuenca	Calibración		Validación		Años extremos	
	Inicio	Término	Inicio	Término	Secos	Húmedos
Est. El Manzano antes junta Río Teno	Ene-80	Dic-83	Ene-76	Dic-79	76/81/83	78/82
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	Ene-86	Dic-98	Ene-75	Dic-85	98	93
Río Diguillín en San Lorenzo	Ene-91	Dic-06	Ene-75	Dic-90	98	01/06
Río Purapel en Nirivilo	Ene-85	Dic-93	Ene-79	Dic-84	85/90	92
			Ene-00	Dic-02		
Río Cauquenes El Arrayan	Ene-92	Dic-06	Ene-81	Dic-91	98/03	05/06
Río Lirquén en Cerro El Padre	Ene-91	Dic-06	Ene-75	Dic-90	98	92/93/01
Río Malleco en Collipulli	Ene-88	Dic-99	Ene-77	Dic-87	98	91/92/93
Río Lonquén en Trehuaco	Ene-86	Dic-95	Ene-96	Dic-05	90/98	86/87/88
Río Pingueral en Dichato	Ene-85	Dic-88	-	-	-	-
Río Nicodahue en Pichún	Ene-96	Dic-06	Ene-88	Dic-90	98	-
Río Andalien camino a Penco	Ene-93	Dic-06	Ene-83	Dic-92	96/98	05/06
Río Laraquete en el cajón	Ene-85	Dic-90	Ene-91	Dic-95	90	-
Río Carampangue en Carampangue	Ene-76	Dic-79	Ene-80	Dic-83	-	77
Río Lebu en Las Corrientes	Ene-80	Dic-83	Ene-76	Dic-79	83	80
Río Caramávida en Caramávida	Ene-86	Dic-89	Ene-82	Dic-85	-	-
Río Cayucupil en Cayucupil	Ene-80	Dic-83	Ene-76	Dic-79	83	-
Río Butamalal en Butamalal	Ene-79	Dic-86	Ene-94	Dic-96	87	79
Río Reputo en Reputo	Ene-76	Dic-80	Ene-81	Dic-83	76/83	77/78/80

11.2 RELLENO DE LAS ESTADÍSTICAS DIARIAS

El modelo requiere estadísticas diarias de precipitaciones, estadísticas diarias de caudales observados y estadísticas mensuales de evaporación, absolutamente completas para poder operar. Las estadísticas mensuales de evaporación ya se habían rellenado para el cálculo del parámetro B, según se explica en el Capítulo 6, Evaporación: Obtención del parámetro B.

Las estadísticas de caudales observados se rellenaron con cero cuando faltaban datos.

Las estadísticas de precipitaciones se rellenaron de la siguiente manera:

- se determinaron las estaciones meteorológicas más cercanas con datos en el período a rellenar
- en base a la visualización de las estadísticas diarias que permiten los gráficos PP, se escogió la estación a utilizar
- se rellenó el (los) día(s) faltantes usando la distribución diaria de la precipitación mensual en la estación seleccionada. Siempre se respetó el total mensual salvo en algunos casos excepcionales que se mencionan a continuación. El total mensual proviene del relleno a nivel mensual que se presenta en el Capítulo 3, Precipitaciones: Obtención del parámetro A.

En el Cuadro N° 32 a continuación, se presenta para cada estación, la estación utilizada para el relleno diario.

Cuadro N° 32
Estaciones pluviométricas usadas para relleno diario

Estación fluviométrica / Cuenca	Estación pluviométrica	
	Base	Relleno
Est. El Manzano antes junta Río Teno	La Rufina	El Manzano
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	Bullileo Embalse	Fundo Atacalco
Río Diguillín en San Lorenzo	Fundo Atacalco	Bullileo Embalse
Río Purapel en Nirivilo	Nirivilo	-
Río Cauquenes El Arrayan	Tutuvén Embalse	Nirivilo
Río Lirquén en Cerro El Padre	Cerro El Padre	-
Río Malleco en Collipulli	Laguna Malleco	Encinar Malleco
Río Lonquén en Trehuaco	Coelemu	Chillancito
Río Pingual en Dichato	Coelemu	Chillancito
Río Nicodahue en Pichún	Angol	Los Angeles
Río Andalien camino a Penco	Chillancito	Coelemu
Río Laraquete en el Cajón	Laja	Fundo Las Achiras / Los Angeles
Río Carampangue en Carampangue	Los Angeles	-
Río Lebu en Las Corrientes	Fundo Las Achiras	Los Angeles
Río Caramávida en Caramávida	Cañete	Angol
Río Cayucupil en Cayucupil	Cañete	Collipulli
Río Butamalal en Butamalal	Cañete	Collipulli
Río Reputo en Reputo	Cañete	Collipulli

11.3 PROCESO DE CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN

De acuerdo con la revisión bibliográfica presentada en el capítulo 1, el estudio SIT 110 detalla con precisión el efecto que tiene la variación de los diferentes parámetros de simulación sobre los caudales simulados. Además, dicho estudio detalla una secuencia o metodología de calibración.

En dicho estudio SIT 110 se calibraron 3 cuencas (Estero los Puercos en puente Los Puercos, Río Purapel en Nirivilo, Río Catillo en Digua) mientras que el presente estudio incluyó 18 cuencas para calibrar. En el presente estudio en general se pudieron verificar las conclusiones del estudio SIT 110. Sin embargo, a raíz del extenso trabajo de calibración realizado, se aportan algunos comentarios adicionales.

Como lo menciona el estudio SIT 110, se pueden destacar 3 parámetros de mayor relevancia para la calibración que son:

- la constante de embalse subterráneo K,
- la constante de infiltración Khid,
- el parámetro de corrección de precipitaciones A.

Todos los demás parámetros, incluido la altura capilar Hcap, aunque influyen en la forma de la señal simulada, pueden ser caracterizados como de menor relevancia.

Un análisis detallado de los efectos de cada uno de estos parámetros se encuentra sintetizado en los Cuadros N° 2 y 3 del subcapítulo 2.2.7.

Complementando el contenido de dichos cuadros, se puede decir que el parámetro de la altura capilar Hcap (mm) sí tiene influencia en la señal simulada y que un aumento del valor provoca una disminución de la definición y de los peaks, al mismo tiempo que contribuye a aumentar el flujo base en los periodos húmedos.

Para cada parámetro se hizo una calibración gruesa y fina. El orden de calibración de los parámetros fue, en una primera etapa, K, luego Khid y luego A, por ser los de mayor relevancia, y en una segunda etapa, todos los demás. Los parámetros de humedad del suelo Scc, Scrit y Smin en general no se calibraron.

Una vez calibrado el modelo, se probó el set de parámetros aplicándolo a los datos del período de validación, y modificándolo en caso necesario.

A continuación, en las Figuras N° 22 a y b, se presentan, a modo de ejemplo para la estación El Manzano antes Junta río Teno, los gráficos de las series de caudales observados versus simulados en función del tiempo, como resultados de los procesos de calibración y validación. Los caudales observados están en azul, mientras que los simulados, en rojo. Toda la serie de gráficos para el total de estaciones calibradas, se encuentra en el Anexo Digital 11.3.1 Gráficos Calibración Validación.

Figura N° 22a

Calibración - El Manzano antes junta con Río Teno

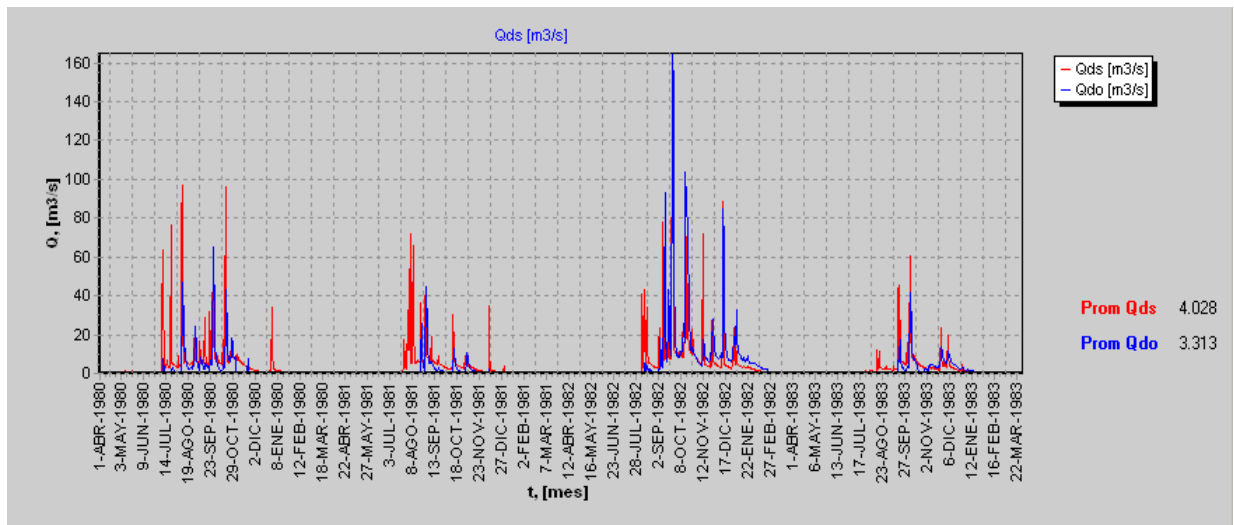
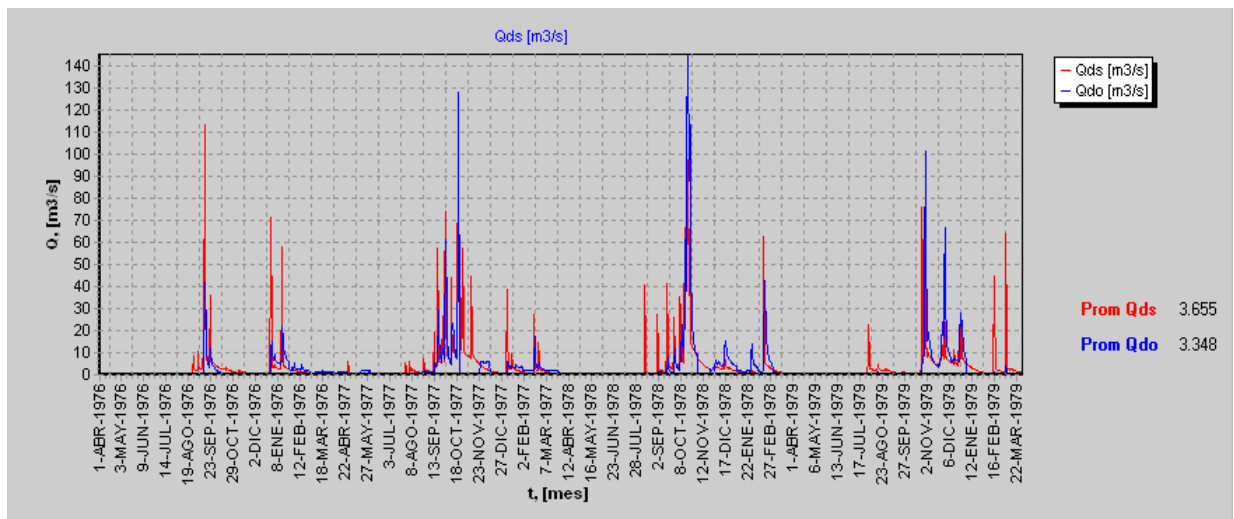


Figura N° 22b
Validación – El Manzano antes junta con Río Teno



11.4 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Todos los parámetros calibrados se presentan de dos formas:

- como datos en el archivo Elab Arch Calib del Anexo Digital 11.1, en el cual se comparan los parámetros calibrados con sus valores iniciales, del cual se extrajo el Cuadro N° 33 adjunto, y
- en forma espacial, como coberturas .shp para ArcView o ArcGis. Los diferentes rangos de valores se representaron con graduación de colores de modo de facilitar un análisis visual de la repartición espacial de los valores de los parámetros calibrados. Se generó una cobertura para cada parámetro, con miras a detectar alguna relación espacial entre los parámetros calibrados, según se comenta en el siguiente capítulo. No se generaron coberturas para los parámetros A y B, pues, dada su génesis, no hay razón para que estos parámetros presenten una relación espacial entre las diferentes cuencas. Las coberturas resultantes se presentan en las Figuras N° 23 a 30.

En el Anexo Digital 11.4.1 Carpetas para simulación con parámetros calibrados, se entregan las carpetas con los archivos correspondientes, con los que se realizaron las simulaciones.

Además, se calculó, para cada proceso de calibración o validación, el parámetro de Nash-Sutcliffe, para tener una idea de la bondad del ajuste. Este coeficiente mide la eficiencia del modelo para predecir los caudales observados y se define como:

$$CNS = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{t=tf} (Q_{do}^t - Q_{ds}^t)^2}{\sum_{t=0}^{t=tf} (Q_{do}^t - \overline{Q_{do}})^2}$$

donde:

- t es un instante dado del periodo de calibración o validación
- tf es el instante donde se termina la calibración o validación
- Q_{do}^t y Q_{ds}^t son respectivamente los caudales diarios observados y simulados al instante t
- $\overline{Q_{do}}$ es el valor promedio de los valores de caudales simulados en el periodo de calibración o validación

El coeficiente CNS toma valores entre $-\infty$ y 1. Básicamente, mientras más cerca de 1, mejor es la predicción del modelo.

CNS= 1, significa que el modelo replica perfectamente los datos observados, o sea que en cada instante el valor del caudal simulado es igual al valor de caudal observado en el mismo instante.

Al contrario, $-\infty < \text{CNS} < 0$ significa que el modelo no replica bien los datos observados, y que éstos quedan mejor explicados por el promedio que por el modelo. De hecho, $\text{CNS}=0$ significa que el promedio de los valores observados explica tan bien los datos observados como los explica el modelo.

Los valores calculados para este coeficiente se encuentran en el Cuadro N° 33 adjunto.

Los valores que adopta este coeficiente se encuentran entre -0.370 para la validación de la cuenca controlada por la estación Laraquete en el Cajón y 0.631 para la calibración de la cuenca controlada por la estación Niblinto antes BT emb. Coihueco. La mayoría de los valores están comprendidos entre 0.1 y 0.5.

El archivo que contiene el cálculo de este coeficiente se encuentra en el Anexo Digital 11.4.2 Cálculo Coeficiente Nash-Sutcliffe.

Cuadro N° 33
Resumen de resultados de parámetros iniciales y calibrados y coeficiente de Nash-Sutcliffe

Cuenca	A ini	A calib	B ini	B calib	PorEf ini	PorEf calib	Hcap ini	Hcap calib	Khid ini	Khid calib	Sec ini	Sec calib	Scrit ini	Scrit calib	Smin ini	Smin calib	Hsuelo ini	Hsuelo calib	K ini	K calib	Area ini	Area calib	Coef. de Nash-Sutcliffe	
	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[mm]	[mm]	[mm/hr]	[mm/hr]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[°/l]	[mm]	[mm]	[hr]	[hr]	[km2]	[km2]	Calibración	Validación
Río Purapel en Nirivilo	0.973	0.500	0.434	0.200	0.450	0.450	100.000	700.000	4.088	0.600	0.750	0.750	0.575	0.575	0.458	0.458	138.889	280.000	740.000	540.000	288.600	288.600	0.479	-0.213 / 0.520
Río Cauquenes El Arrayan	0.983	0.620	0.515	0.230	0.360	0.360	170.000	1000.000	1.971	0.750	0.786	0.770	0.645	0.640	0.551	0.100	149.701	150.000	810.000	285.000	625.600	625.600	0.453	0.380
Río Lonquén en Trehuaco	0.957	0.750	0.515	0.700	0.320	0.450	240.000	1400.000	0.582	0.500	0.870	0.800	0.719	0.719	0.618	0.300	105.263	160.000	980.000	500.000	1090.900	1090.900	0.171	0.183
Río Pingüeral en Dichato	1.400	0.700	0.537	0.540	0.320	0.320	240.000	500.000	0.609	1.000	0.870	0.870	0.719	0.719	0.618	0.618	131.579	100.000	1420.000	2000.000	252.000	252.000	-0.344	-
Río Andalien camino a Penco	1.280	0.520	0.947	0.600	0.350	0.250	200.000	200.000	1.808	0.800	0.786	0.786	0.645	0.645	0.551	0.551	89.820	35.000	1880.000	1260.000	740.200	740.200	0.006	-0.345
Río Niblinto antes BT. Emb. Colihueco	0.920	1.120	0.688	0.690	0.470	0.470	160.000	320.000	7.276	2.070	0.714	0.810	0.505	0.505	0.365	0.365	142.857	46.000	660.000	920.000	161.600	161.600	0.631	0.448
Río Laraquete en el cajón	1.078	1.250	0.515	0.600	0.485	0.600	160.000	100.000	5.993	2.000	0.736	0.736	0.538	0.538	0.406	0.406	81.522	35.000	2780.000	1600.000	38.800	38.800	0.054	-0.370
Río Lebu en Las Corrientes	2.187	1.450	0.536	0.540	0.420	0.420	290.000	340.000	0.901	1.000	0.848	0.848	0.695	0.695	0.594	0.594	147.420	30.000	1660.000	900.000	717.400	717.400	0.140	0.208
Río Nicodahue en Pichún	1.002	0.850	0.515	0.400	0.360	0.360	170.000	500.000	2.140	2.170	0.786	0.786	0.645	0.645	0.551	0.551	119.760	55.000	1360.000	1350.000	792.000	792.000	0.579	0.327
Río Carampangue en Carampangue	1.754	1.200	0.588	0.100	0.330	0.330	220.000	220.000	1.368	1.900	0.814	0.814	0.667	0.667	0.569	0.569	143.266	143.000	2040.000	1000.000	1204.000	1204.000	0.114	-
Río Caramávida en Caramávida	2.238	1.100	0.552	0.550	0.430	0.430	90.000	90.000	3.173	1.000	0.765	0.765	0.606	0.606	0.500	0.500	113.636	55.000	1470.000	1600.000	149.000	149.000	-0.115	0.161
Río Cayucupil en Cayucupil	1.753	1.400	0.608	0.608	0.400	0.600	60.000	280.000	2.488	1.400	0.768	0.768	0.618	0.618	0.518	0.518	147.929	50.000	1720.000	1350.000	168.700	168.700	0.085	0.139
Río Butamalal en Butamalal	1.459	1.150	0.553	0.550	0.320	0.320	240.000	350.000	0.459	0.600	0.870	0.870	0.719	0.719	0.618	0.618	78.947	28.000	1670.000	1500.000	114.400	114.400	0.176	0.051
Est. El Manzano antes junta Río Teno	1.113	0.750	0.670	0.670	0.460	0.460	160.000	160.000	7.803	1.000	0.714	0.714	0.505	0.505	0.365	0.365	200.000	40.000	840.000	410.000	133.300	133.300	0.281	0.406
Río Lirquén en Cerro El Padre	1.656	1.100	0.744	0.400	0.470	0.470	160.000	160.000	7.533	3.500	0.714	0.714	0.505	0.505	0.365	0.365	285.714	350.000	660.000	430.000	101.500	101.500	0.437	0.412
Río Malleco en Collipulli	0.836	0.730	0.596	0.800	0.485	0.300	160.000	160.000	5.437	2.500	0.746	0.746	0.555	0.555	0.428	0.428	241.287	100.000	890.000	650.000	410.000	410.000	0.540	0.447
Río Reputo en Reputo	1.277	0.900	0.616	0.620	0.340	0.320	200.000	1000.000	1.613	1.000	0.800	0.800	0.657	0.657	0.561	0.600	146.628	60.000	890.000	1050.000	14.300	14.300	0.526	0.548
Río Diguillín en San Lorenzo	1.012	1.050	0.548	0.550	0.400	0.630	80.000	900.000	19.214	1.600	0.545	0.545	0.404	0.404	0.309	0.309	333.333	29.000	2460.000	970.000	199.200	199.200	0.410	0.435

Figura N° 23
Distribución de la porosidad efectiva PorEf calibrada

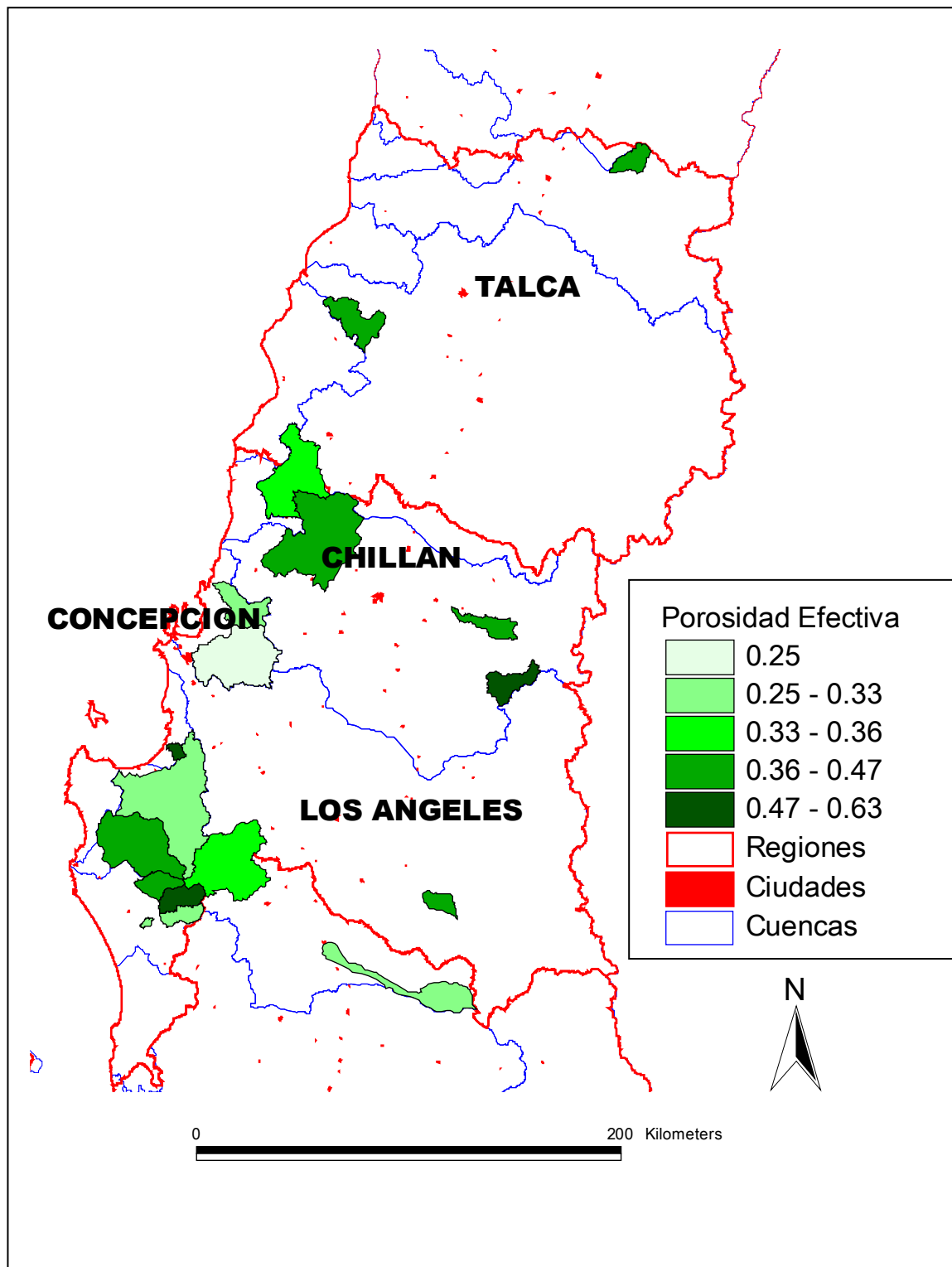


Figura N° 24
Distribución de la altura capilar Hcap calibrada

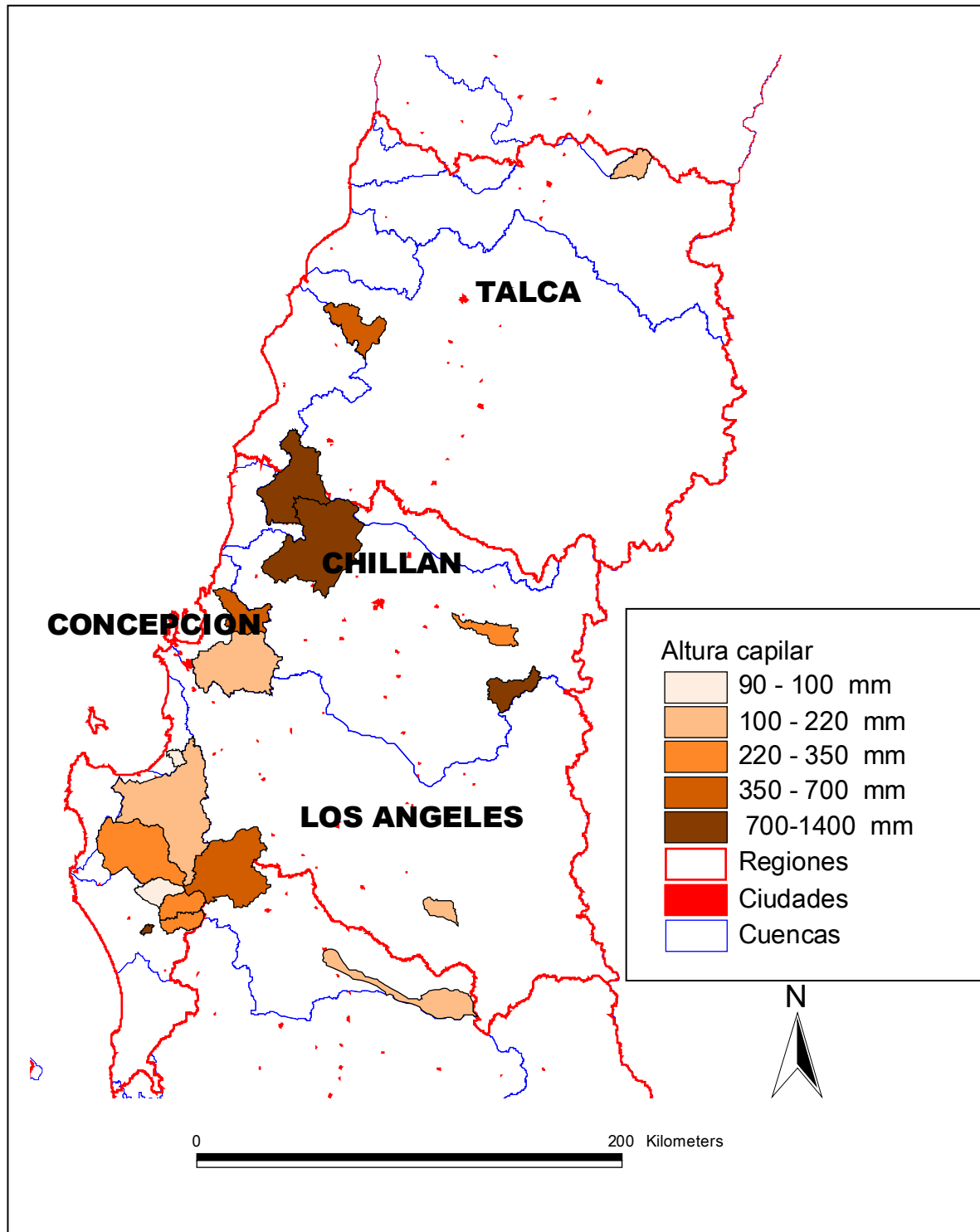


Figura N° 25
Distribución de la conductividad hidráulica Khid calibrada

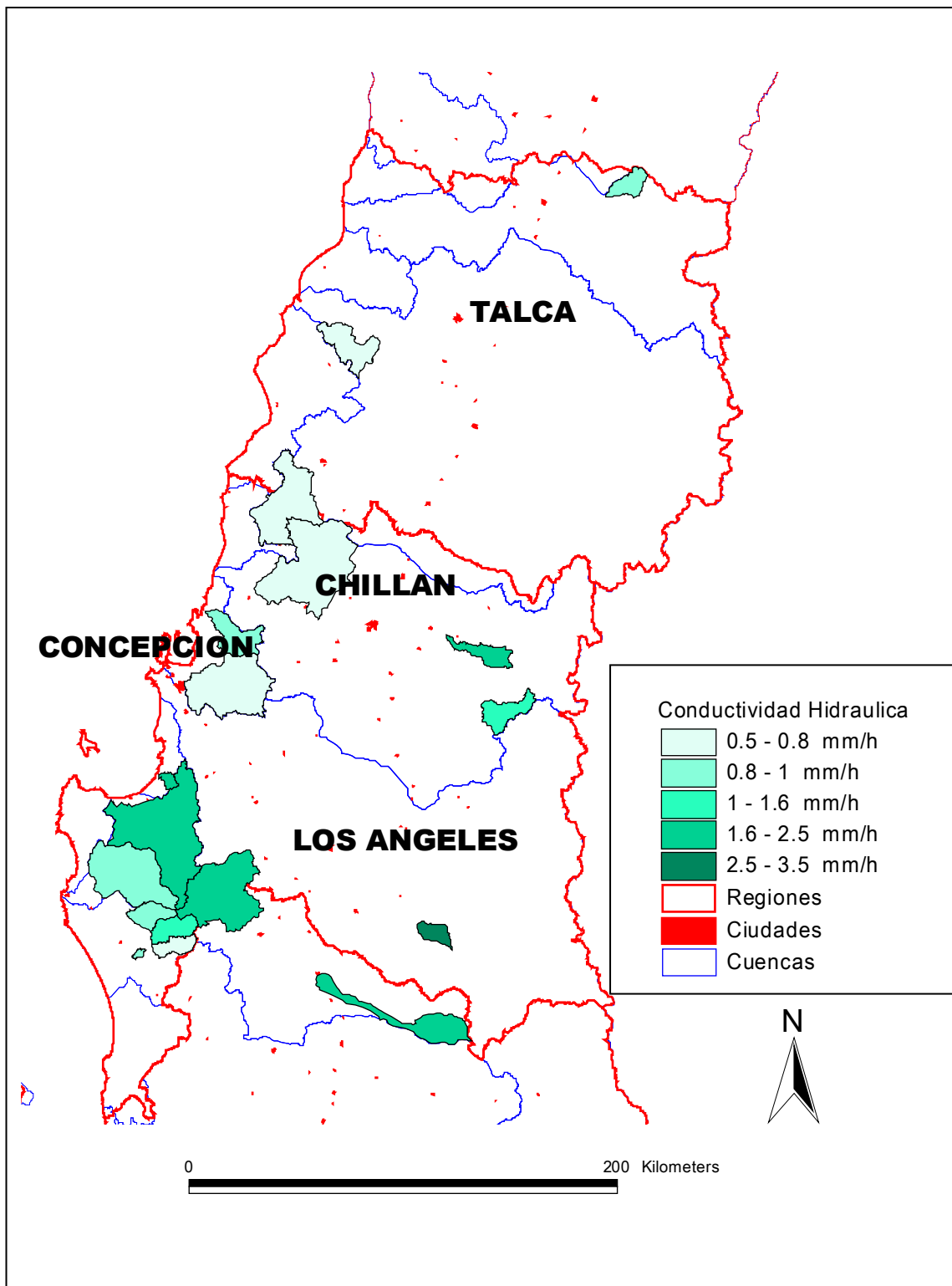


Figura N° 26
Distribución de la capacidad de campo Sec

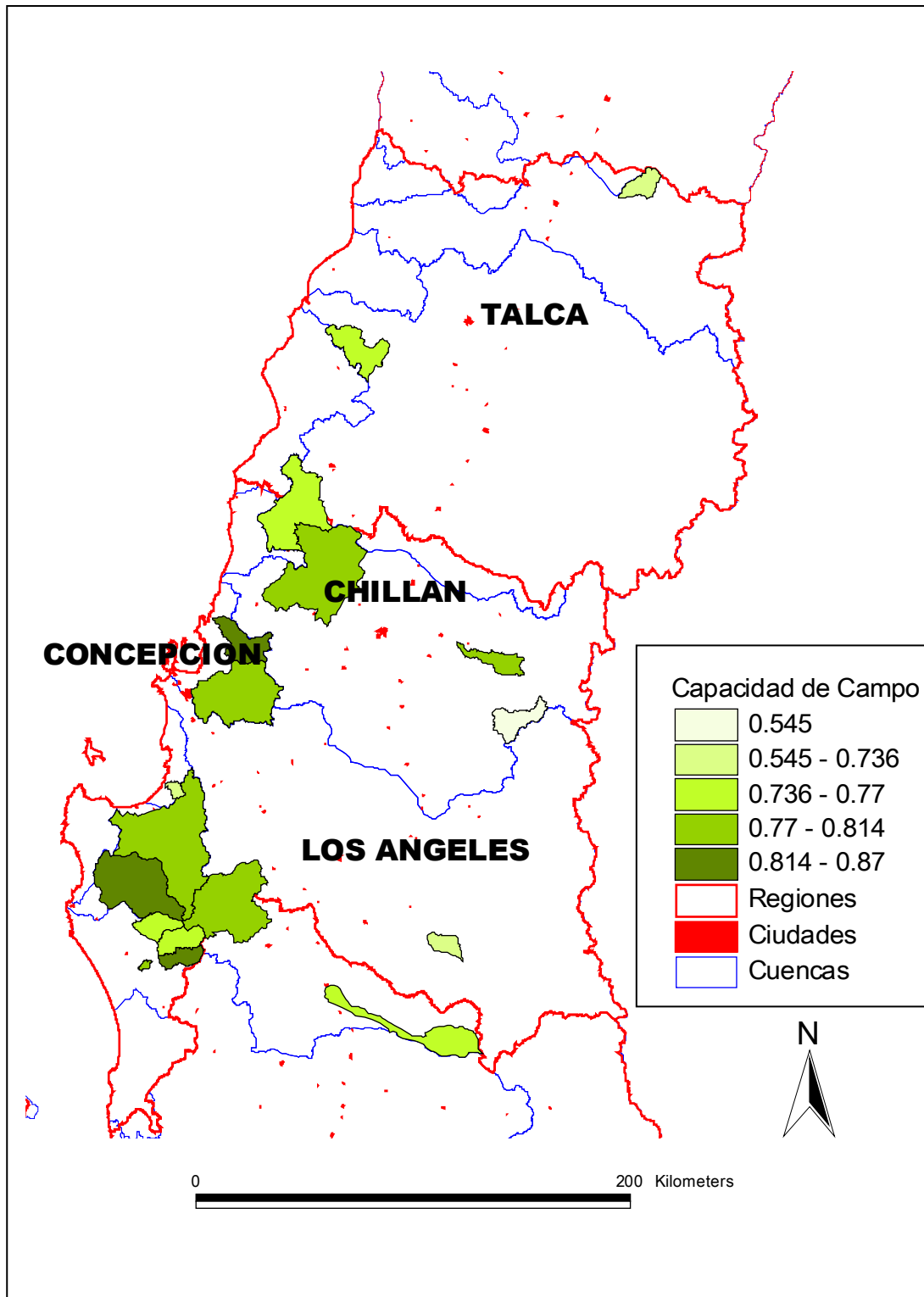


Figura N° 27
Distribución de la humedad crítica Scrit

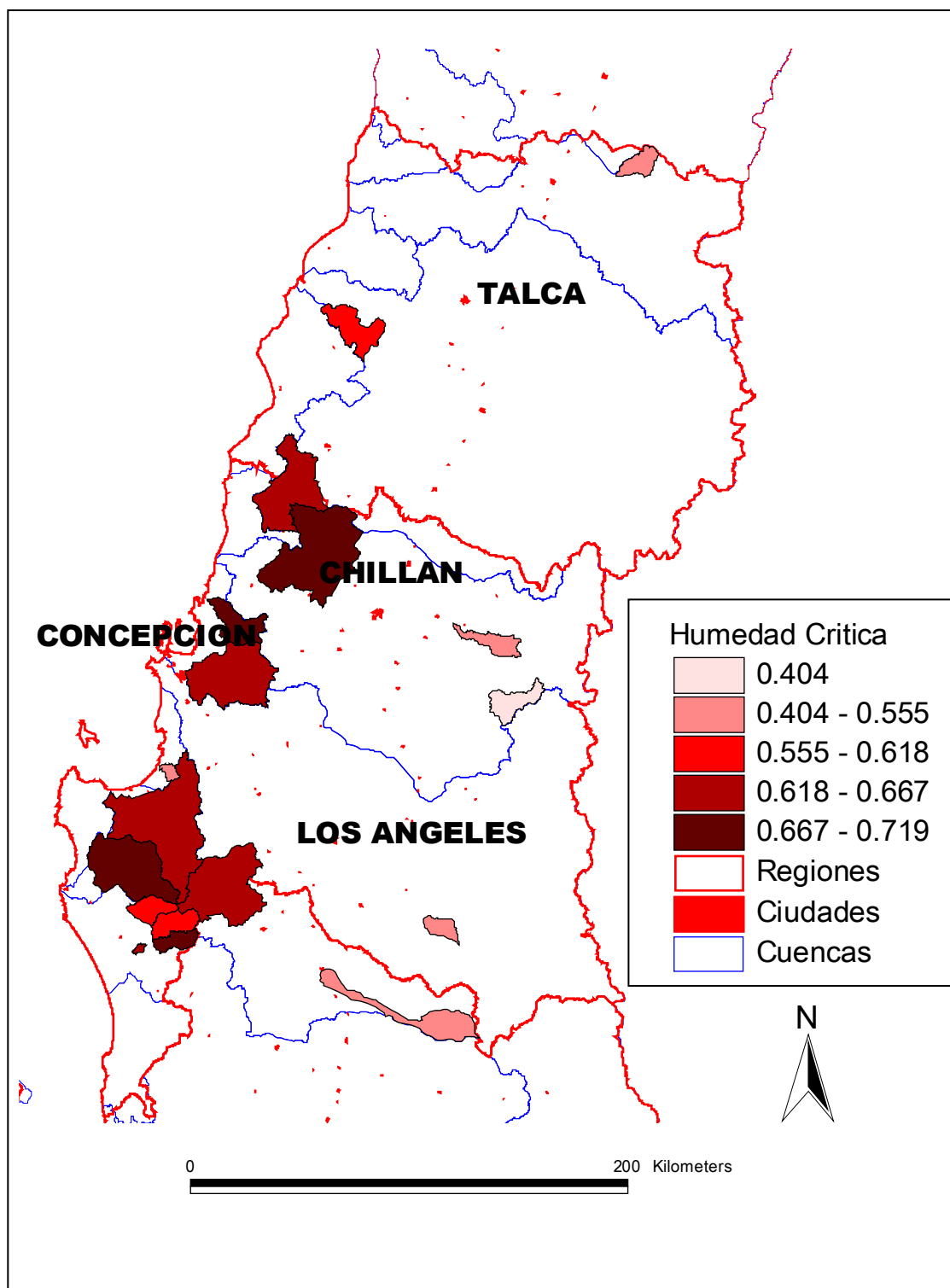


Figura N° 28
Distribución de la humedad del punto de marchitez permanente Smin

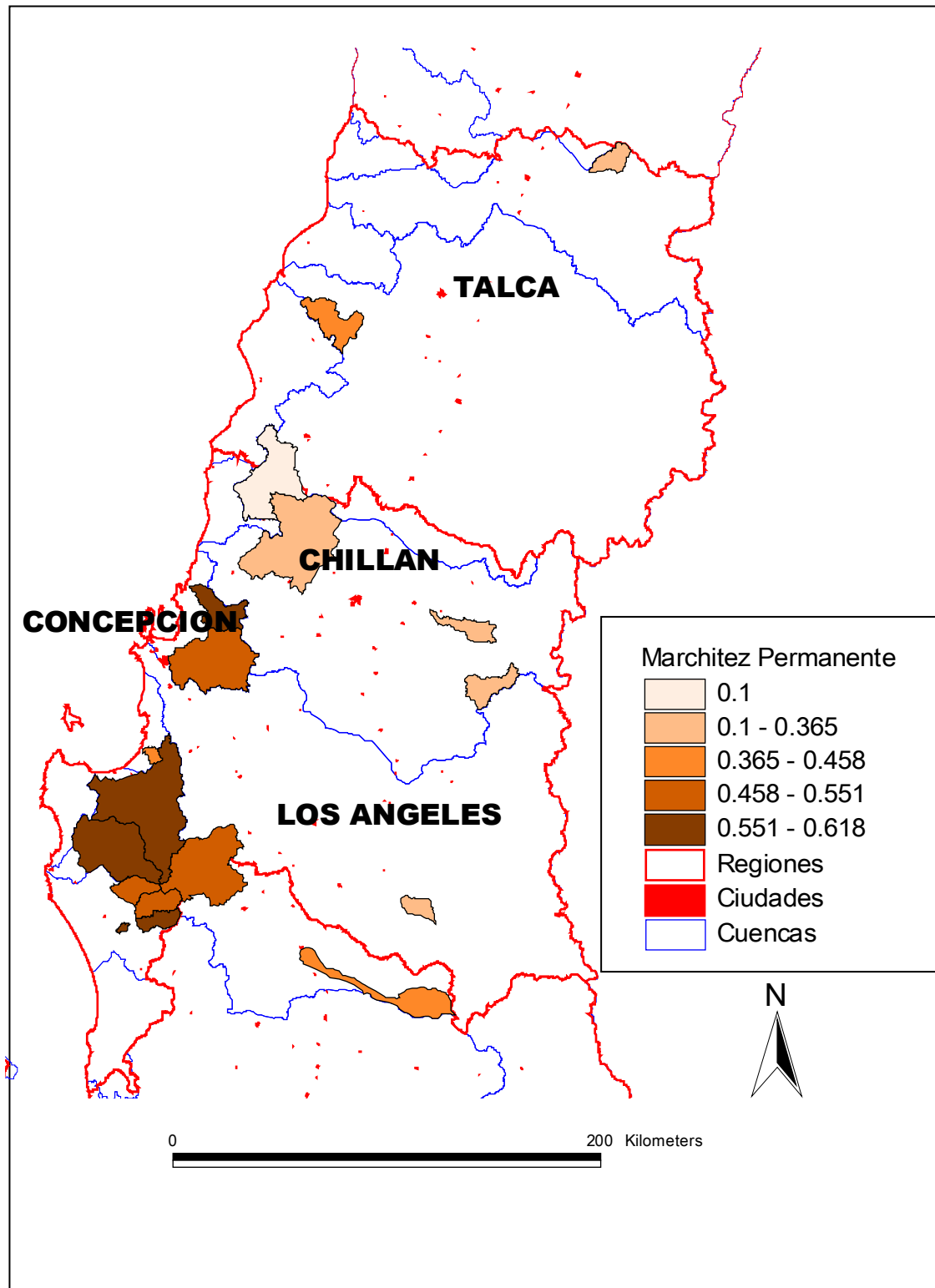


Figura N° 29
Distribución de la altura del suelo Hsuelo calibrada

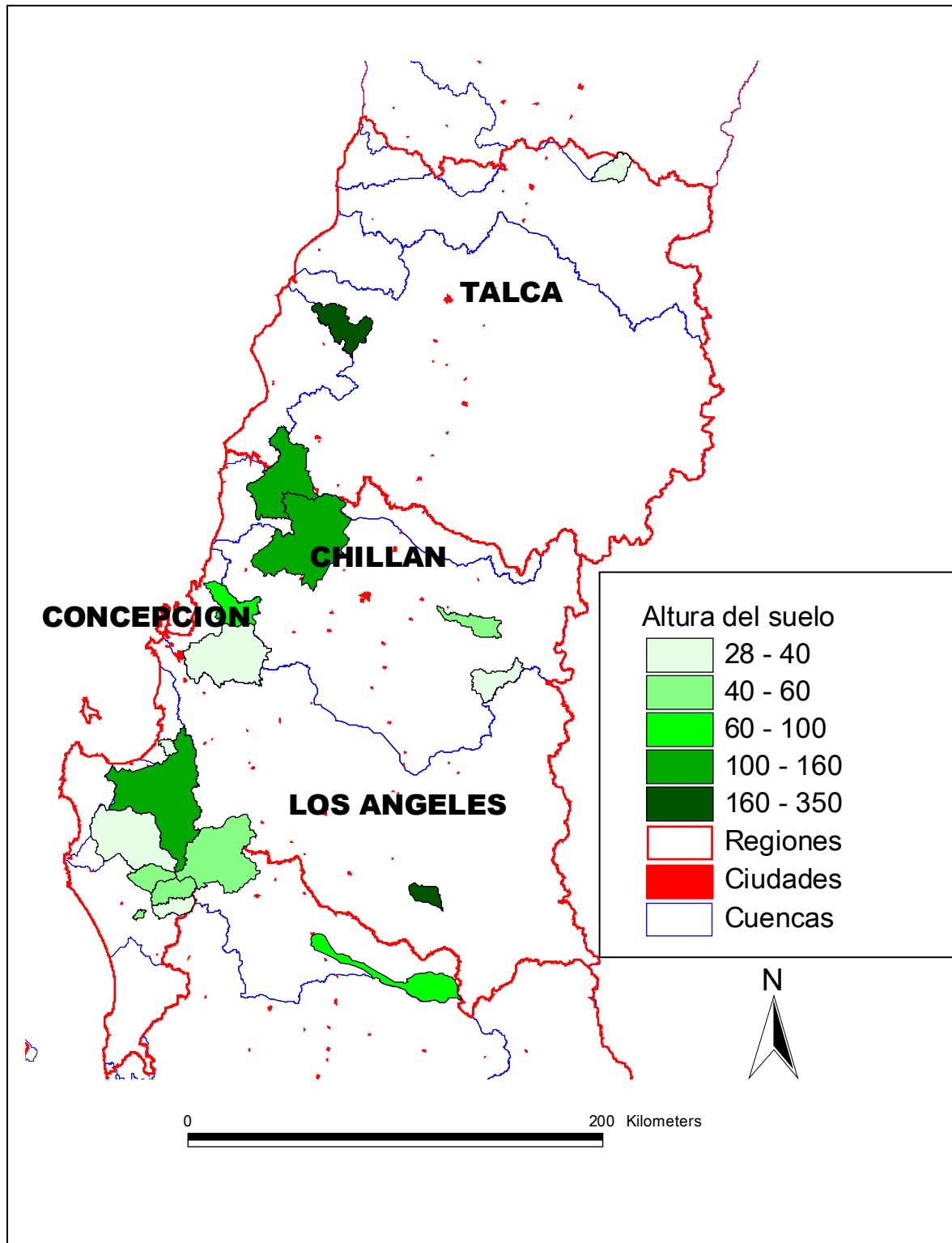
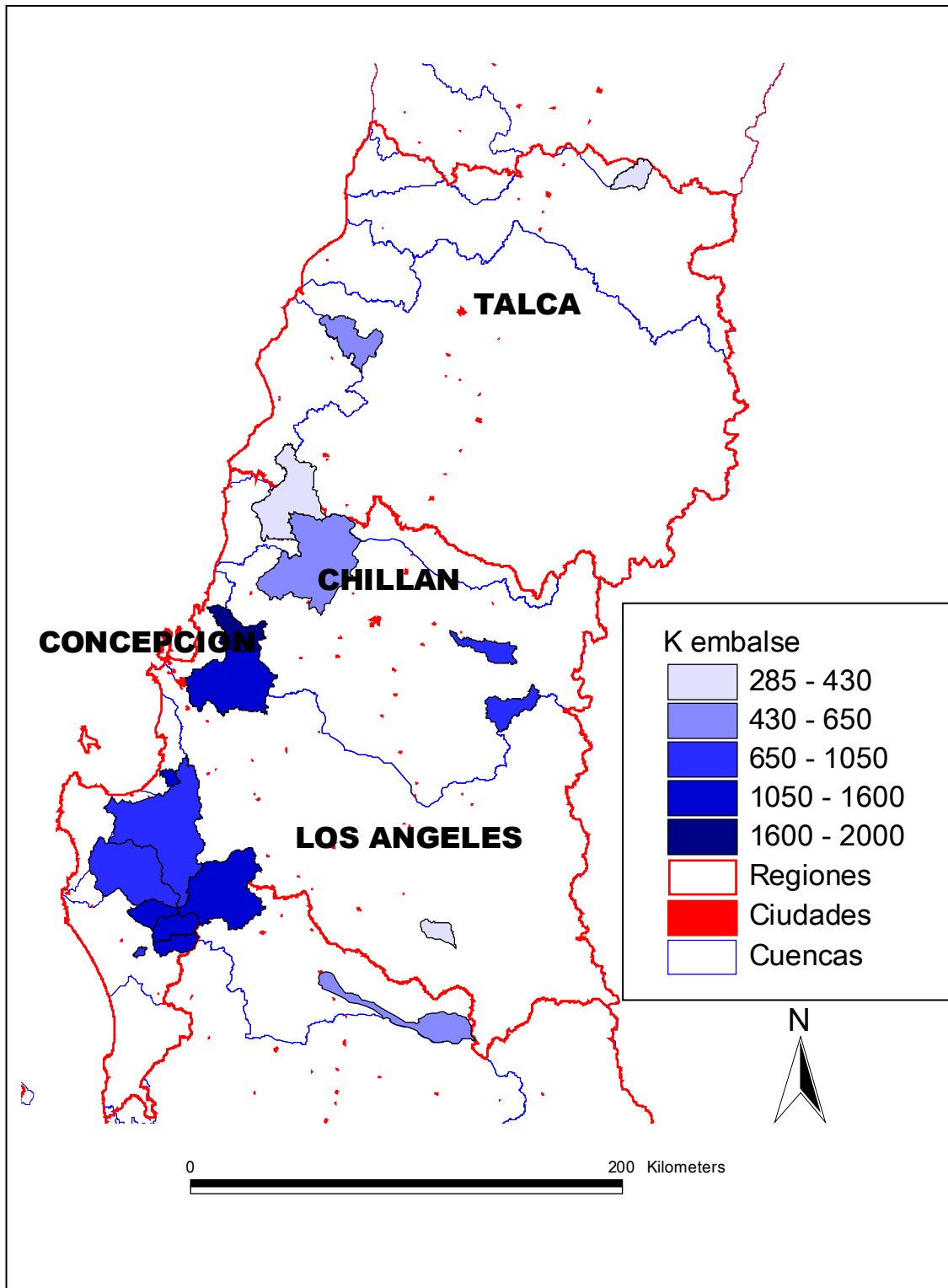


Figura N° 30
Distribución de la constante de embalse K calibrada



11.5 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS INICIALES Y CALIBRADOS

Todo el trabajo de los capítulos 4 a 10 se ha referido a la determinación de valores iniciales de parámetros. Se puso gran énfasis en la determinación de rangos físicos dentro de los cuales las variables podrían moverse.

Sin embargo, en términos generales, los parámetros finales de calibración no se encuentran dentro de los rangos físicos previamente determinados. Para lograr el mejor ajuste hubo que adoptar valores fuera de los rangos.

Para ilustrar este fenómeno se graficaron las relaciones valor calibrado y su rango (max y min) función del valor inicial del parámetro para los parámetros A, B, PorEf, Hcap, Hsuelo, Khid y K. Los gráficos correspondiente se encuentran en el archivo “Elab Arch Calib.xls” del Anexo Digital 11.1, en la hoja “Tabla final y gráficos”. Los parámetros sec, smin y scrit prácticamente no se calibraron por lo cual no entran en este análisis.

Lo observado se ha interpretado de la siguiente manera:

- El valor final del parámetro A no se encuentra dentro del rango físico predeterminado en base a los polígonos de Thiessen e isohietas, ambos muy similares. Por lo general, A calib resulta bastante menor que A inicial, lo que podría explicarse, al menos parcialmente, por la diferencia de comportamiento a nivel de cuenca versus estación, entre los promedios anuales y las tormentas individuales.
- El parámetro Hcap en general sí se encuentra dentro del rango físico predeterminado, aunque en general se obtiene que Hcap calibrado < Hcap inicial. Este es el único parámetro que, calibrado, por lo general se mantiene dentro del rango físico. Esto se puede explicar por lo amplio de dichos rangos.
- El parámetro Hsuelo no respeta los rangos físicos precalculados, y en general resulta que Hsuelo calibrado < Hsuelo inicial. Los rangos físicos calculados son muy estrechos.
- El parámetro Khid no respeta los rangos físicos calculados y por lo general Khid calib ~ Khid min < Khid inicial
- El parámetro K no respeta los rangos físicos calculados y por lo general K calib ~ K min < K inicial salvo para K inicial grande donde se tiene K calib < Kmin

Para los demás parámetros no se pudo observar ningún comportamiento en particular, salvo que cuando se calibraron, por lo general abandonaron sus rangos respectivos.

Esto muestra que al calibrar el modelo, los parámetros se modificaron, algunos en forma importante, con lo que dejan de representar lo que, al definirlos, se buscaba representar con ellos.

La razón de lo señalado radica en dos aspectos:

- Por una parte, en que, dentro del modelo, pocos parámetros están encargados de representar un comportamiento muy complejo de un suelo muy heterogéneo, comportamiento que probablemente requeriría de una gran cantidad de parámetros para ser adecuadamente representado. De esta forma, cada parámetro está encargado ya no de representar un solo fenómeno, sino que varios fenómenos a la vez, de modo que el sentido físico estricto de cada uno se “contamina” con otros, al tener que representar muy pocos parámetros la función de muchos.
- Por otra parte, hay algunos parámetros cuyos valores iniciales podrían ser determinados de forma más adecuada. Se trata de los parámetros de suelo, S_{min} , S_{crit} y S_{cc} , los cuales, determinados a partir de K_{hid} , resultaron poco realistas. A partir de otra forma de determinación inicial de estos parámetros, en base a la textura del suelo, según se propone más adelante, es posible evitar que los demás parámetros, especialmente el parámetro A , tenga que modificarse tan sustancialmente que ya no represente la relación de precipitaciones estación/cuenca.

Por esta razón, y observando lo que ocurre en la calibración con los parámetros, que es que se alejan de su valor inicial, es posible entender tres cosas:

- por un lado, la importancia de estimar adecuadamente los parámetros iniciales
- por otro lado, que los parámetros calibrados difícilmente se prestarán para ser extrapolados espacialmente
- y que, por lo tanto, los parámetros calibrados en una cuenca no tienen por qué representar bien el comportamiento de otra cuenca.

La única forma de intentar una extensión espacial de parámetros siempre será ligada al sentido físico de ellos, y por lo tanto, tendrá más sentido hacerla a partir de parámetros iniciales, como se muestra en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 12**EXTENSIÓN DE PARÁMETROS
HACIA EL RESTO DE LA ZONA DE ESTUDIO****12.1 DEFINICIÓN DEL RESTO DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Una vez obtenidos todos los parámetros calibrados en las cuencas seleccionadas, fue necesario definir cuáles serían las subcuencas pluviales en las que se podría aplicar el modelo SIMED para determinar escorrentía pluvial.

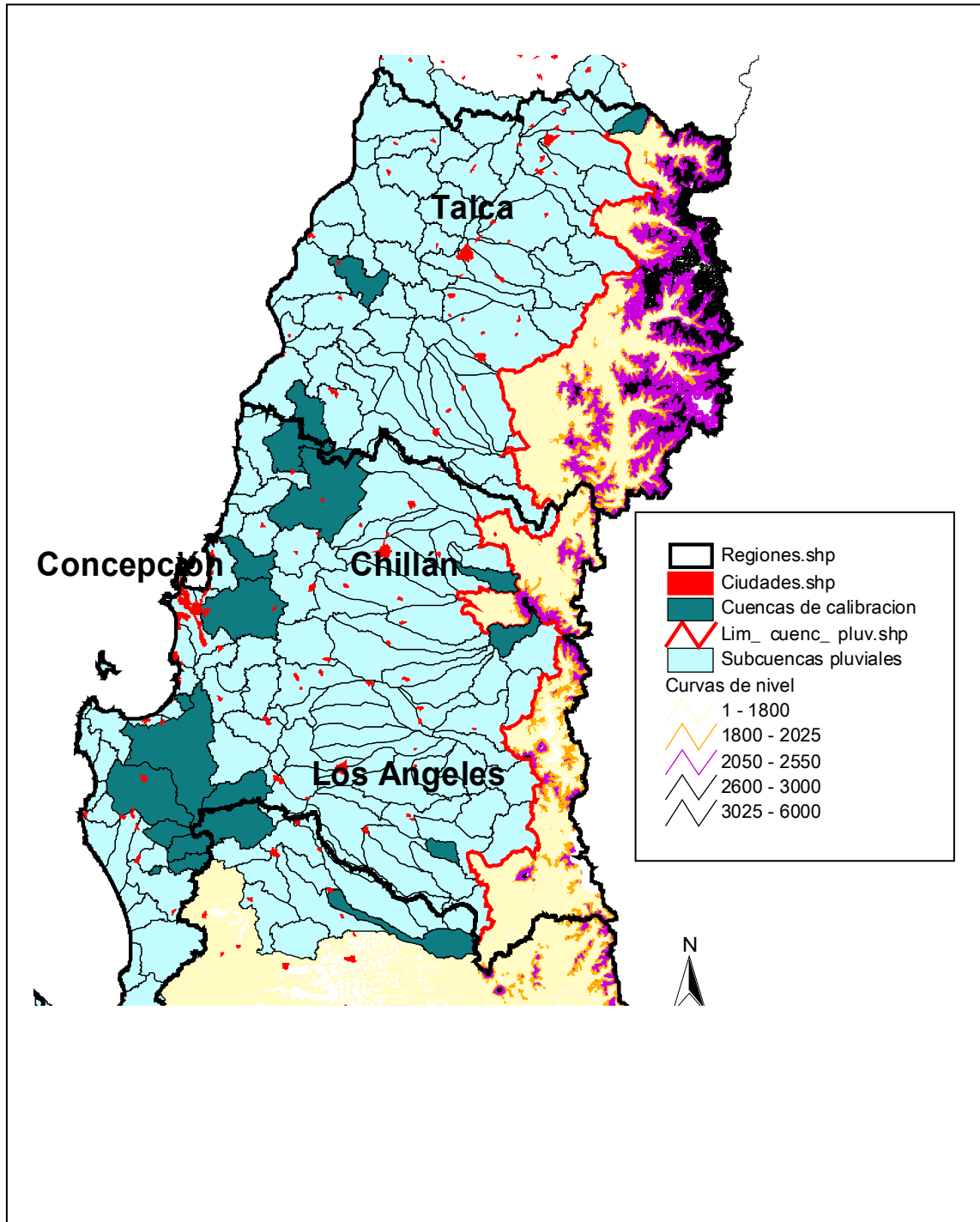
La definición de subcuencas pluviales se hizo en base a la cobertura de subsubcuencas de la DGA, que se presenta en la Figura N° 31 adjunta.

Se procedió al descarte de subcuencas nivales y nivopluviales en base a los siguientes criterios:

- Se definieron con nivales o nivopluviales todas las cuencas cuyo control fluviométrico así lo indicaba (análisis realizado en el Capítulo 3.2)
- Se usó como apoyo adicional el trazado de la línea de nieve, con el criterio de dejar fuera del área pluvial todas las cuencas con un área mayor que aproximadamente el 50% sobre la línea de nieve.

De esta forma, se llegó a determinar la línea divisoria entre subcuencas pluviales y no pluviales, que se presenta en la siguiente Figura N° 31.

Figura N° 31
Determinación de cuencas pluviales



12.2 REGIONALIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CALIBRADOS

Para llevar a cabo la extensión de los parámetros calibrados a toda la zona de estudio, según se solicitaba en los TR, se hicieron varios análisis, que se presentan a continuación.

a) Despliegue espacial de los parámetros

Es el que se muestra en el capítulo 11.4, Resultados de la calibración. Los diferentes rangos de valores se representaron con graduación de colores de modo de facilitar un análisis visual de la repartición espacial de los valores de los parámetros calibrados.

Se pudo observar en términos generales que las cuencas cordilleranas tienden a presentar un valor de Khid más alto que las cuencas costeras, comportamiento que es validado por el sentido común.

Sin embargo, cuencas costeras controladas por las estaciones Carampangue en Carampangue, Lebu en Las Corrientes o Nicodahue en Pichún entre otras, no verifican esta regla ya que corresponden a valores de Khid altos, de tal forma que no se puede deducir un comportamiento sistemático que permita proyectar adecuadamente valores de Khid a otras cuencas.

Los demás parámetros calibrados presentan un comportamiento aún más errático, según se puede observar.

Como conclusión, no se pudo observar ninguna tendencia espacial clara de acuerdo con la cual se pudiera sistematizar o zonificar el comportamiento de los parámetros. Lo señalado impide proceder a una proyección de los parámetros hacia otras cuencas en base a un análisis visual.

b) Regresiones entre parámetros

Para determinar si existía alguna relación entre los diferentes parámetros calibrados, se graficaron los valores de K y Khid calibrados, en función de todos los demás parámetros de suelo. Las relaciones obtenidas se presentan en el archivo “Elab Arch Calib.xls” en la hoja “Tabla final y gráficos”, y son las siguientes:

- Khid calibrado en función de Scc calibrado, Smin calibrado y Smin calibrado
- Khid calibrado en función de Hcap calibrado y Hsuelo calibrado
- K calibrado en función de scc calibrado, Smin calibrado y smin calibrado
- K calibrado en función de Hcap calibrado y Hsuelo calibrado y
- Khid calibrado en función de K calibrado

No se pudo observar ninguna tendencia clara que permitiera identificar alguna relación de correspondencia entre los parámetros calibrados. A continuación se presentan tres figuras para ilustrar este análisis.

Figura N° 32
Khid en función de Huelo y Hcap

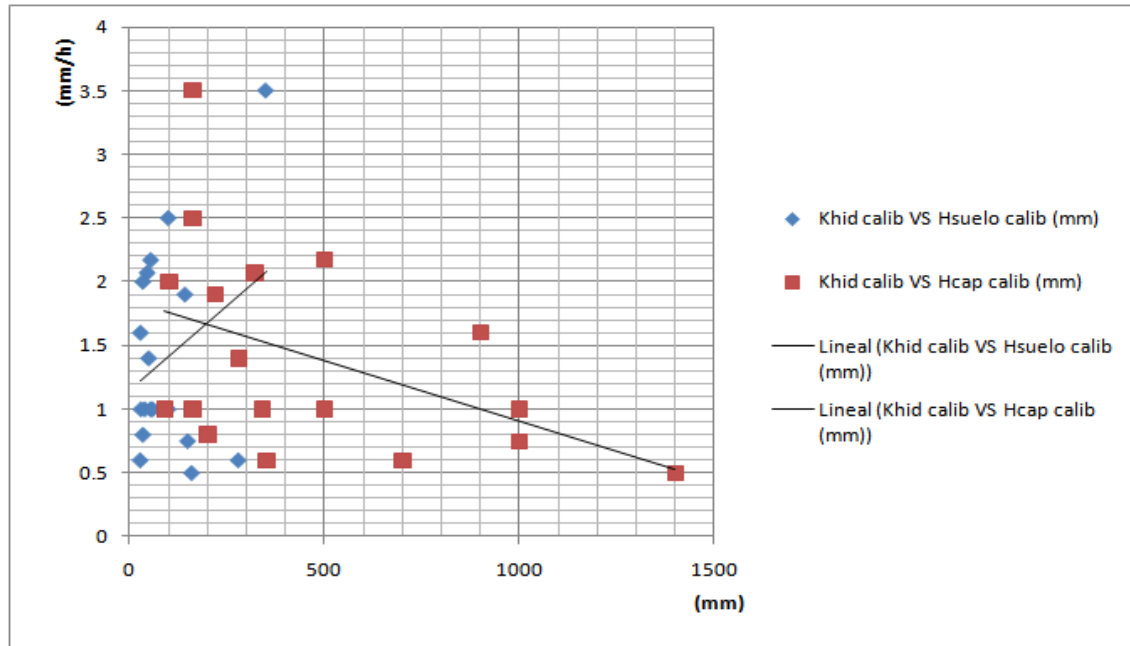


Figura N° 33
K en función de los parámetros de suelo: Scc, Smin, Scrit y PorEf

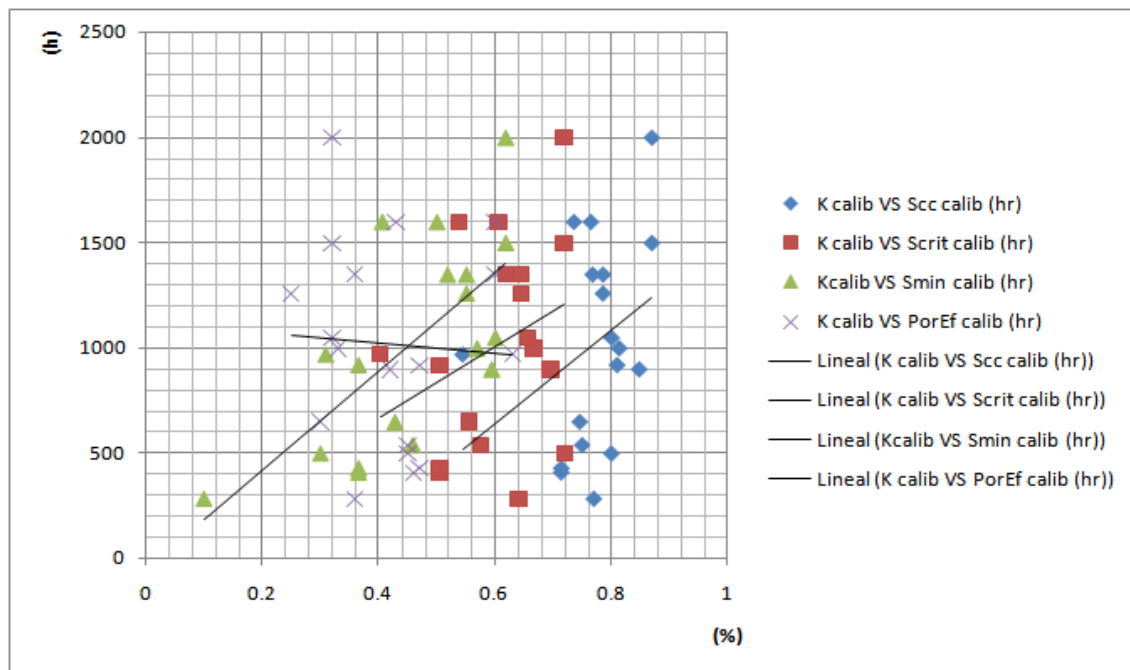
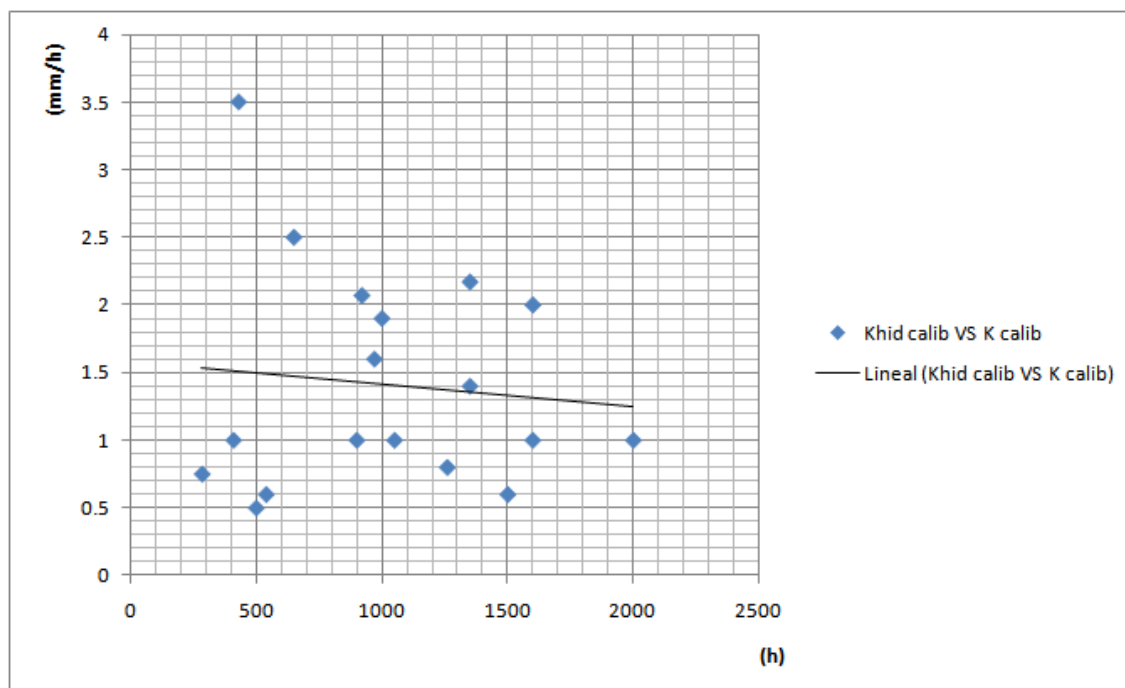


Figura N° 34
Khid en función de K



c) Relaciones entre parámetros del modelo y características del suelo (CIREN)

Como no se encontró ninguna relación entre los parámetros, se buscó relacionarlos con información diferente a la utilizada en la calibración. Para ello, se encontró que podría ser de utilidad contar con las coberturas de suelo que CIREN ha generado en base a los estudios de suelo de la zona de interés. El objetivo de contar con estas coberturas fue el de analizar la posibilidad de apoyar la extensión espacial de los parámetros calibrados, en base a la información regional continua de los suelos.

Se adquirieron, entonces, las siguientes coberturas, que presentan las características de los suelos que se señalan, de acuerdo con las siguientes categorías:

- Textura (muy fina, moderadamente fina, fina, media, gruesa, moderadamente gruesa y muy gruesa)
- Granulometría (arcilloso, francoso, arenoso, trumao, ripio, roca, sopralito y fino)
- Profundidad (<25 cm, 25-50 cm, 50-75 cm, 75-100 cm y >100 cm)
- Capacidad de uso (de I a VIII)

Estas coberturas se entregan en el Anexo 12.2.1

Estas coberturas se analizaron para cada una de las cuencas seleccionadas, determinando el porcentaje de superficie que cae en cada una de las categorías de cada una de las coberturas. El resultado de este análisis se encuentra en el Cuadro N° 34.

Como observación general, se puede comprobar que:

- las cuencas más altas, corresponden a suelos de textura más gruesas y profundidad menor, mientras que las cuencas costeras corresponden a suelos de textura más fina y mayor profundidad
- considerando que la textura de suelo francoso-fino corresponde a Marga, hay una relativamente buena correlación entre las texturas de suelos deducidas de las coberturas del CIREN y los resultados de la Tabla 4.3.1 del V.T. Chow; sin embargo la correspondencia no es exacta ya que se trata de nomenclaturas de tipos de suelos distintas.

Específicamente en relación al objetivo de este análisis, que fue el de apoyar la extrapolación regional de los parámetros calibrados, en función de alguna información de carácter regional, se puede decir lo siguiente:

Hay algunas cuencas cordilleranas que no son cubiertas en su totalidad por las coberturas de CIREN como las cuencas controladas por las estaciones Niblinto antes BT emb. Coihueco, El Manzano antes junta con Río Teno y Diguillín en San Lorenzo.

Para las cuencas que sí están completamente caracterizadas en los estudios de CIREN, se trató encontrar una relación entre los valores calibrados de los parámetros K y Khid y las características de textura, profundidad, granulometría y capacidad de uso.

Al respecto, se pudo observar lo siguiente.

- aquellas que tienen mayor porcentaje de su superficie correspondiente a una textura más gruesa (moderadamente fina, media y gruesa) tienen un Khid alto como las cuencas controladas por las estaciones Niblinto antes BT emb. Coihueco, Nicodahue en Pichún, Carampangue en Carampangue, Lirquén en Cerro El Padre y Malleco en Collipulli, lo cual resulta lógico, dado que texturas más gruesas favorecen la infiltración. Sin embargo, varias otras rompen esta regla, como las cuencas controladas por las estaciones Purapel en Nirivilo y Cauquenes en El Arrayan, lo que impide sacar alguna conclusión definitiva que permita extrapolar valores de Khid calibrados hacia cuencas no calibradas.

- aquellas que tienen un mayor porcentaje de su superficie asignada a una capacidad de uso de los suelos VII u VIII, tienen un Khid más alto como las cuencas controladas por las estaciones Niblinto antes BT emb. Coihueco, Laraquete en el Cajón, Nicodahue en Pichún, Carampangue en Carampangue, El Manzano antes junta con Río Teno, Lirquén en Cerro El Padre y Malleco en Collipulli. Esto resulta relativamente lógico, observando las caracterizaciones de las clases VII y VIII (a continuación). Sin embargo, varias otras rompen esta regla como por ejemplo las cuencas controladas por las estaciones Butamalal en Butamalal, Caramávida en Caramávida y Purapel en Nirivilo, lo que impide sacar alguna conclusión definitiva o encontrar alguna regla para la extrapolación regional.

Recordando lo que significan las clases de suelos VII y VIII, la clase VII corresponde a suelos con limitaciones severas que le hacen inadecuada para los cultivos. Su uso fundamental es forestal y pastos resistentes. Pueden corresponder a algunas formaciones de cerros de pendientes fuertes y a suelos extremadamente delgados ubicados, en terrazas bajas a orillas del río o estero. La clase VIII corresponde a suelos sin valor agrícola ni forestal. Su uso está limitado solamente para la vida silvestre, recreación o protección de hoyas hidrográficas.

Los resultados se presentan en el Cuadro N° 34. Como conclusión de este análisis, se puede decir que no hay ninguna correlación evidente entre los valores calibrados de K y Khid y las características de suelo de las coberturas CIREN.

Cuadro N° 34
Análisis cuencas según coberturas CIREN

ANÁLISIS ESTUDIOS DE SUELOS CIREN																														
Estación fluviométrica / Cuenca	Textura						Profundidad (cm)						Granulometria				Capacidad de uso								OBSERVACIONES					
	F++	F+	F	M	G	G+	G++	<25	25-50	50-75	75-100	>100					I	II	III	IV	VI	VII	VIII		V.T. Chow	Triangulo textural	Hsuelo			
Est. El Manzano antes junta Rio Teno						40		10		30			35% Fr-Ro	3% Tr	1% FrF							30	10	60% AFUERA	Marga limosa	CL/SiCL	20			
Rio Niblinto antes BT. Emb. Coihueco				20								20	15% Tr	2% Tr-Arc	2% Fr-Are			3	5	2	2	20	20	50% AFUERA	Marga limosa	CL/SiCL	14			
Rio Diguillin en San Lorenzo																								100% AFUERA	Arena margosa	SaL	33			
Rio Purapel en Nirivilo	20	75								25	30	45	55% FrF-Arc	30% Arc	10% FrF	5% FrF-Ri				5	20	65			Marga	CL	14			
Rio Cauquenes El Arrayan		95		5							60	40	60% FrF-Arc	40% FrF					5	5	15	75			Marga areno-arcillosa	SaC	15			
Rio Lirquén en Cerro El Padre				30								45	40% Tr					10	5	15	10	20	40		Marga limosa	CL/SiCL	29			
Rio Malleco en Collipulli		20		40				5	10	30	30	40% Tr	15% Arc	5% Arc-S			10	10	10	5	50	15			Marga limosa	SiCL	24			
Rio Lonquén en Trehuaco	60	30		5	5				40	10	50	60% Arc	30% FrF-Arc	5% FrF				10	15	15	60				Arcilla arenosa	SaC	11			
Rio Pingüeral en Dichato		95								80	20	80% FrF	20% Arc						5	15	80				Arcilla arenosa	SaC	13			
Rio Nicodahue en Pichuín	15	80		5				5	70	25	50% FrF-Arc	30% FrF	10% Arc	5% Are				2	2	5	90	1			Marga areno-arcillosa	SaC	12			
Rio Andalien camino a Penco		95								55	40	55% FrF	40% Arc					5	5	15	70				Marga areno-arcillosa	SaC	9			
Rio Laraquete en el cajón	85	15								10	90	100% FrF-Arc								5	95				Marga limosa	SiCL	8			
Rio Carampangue en Carampangue	15	85								60	40	60% FrF	40% FrF-Arc					5	5	10	80				Marga areno-arcillosa	SaC	14			
Rio Lebu en Las Corrientes	15	80		5						10	90	85% FrF-Arc	10% FrF	5% Arc-FrF				5	10	10	70				Marga arcillosa o limo	C	15			
Rio Caramávida en Caramávida	45	50		5						10	90	90% FrF-Arc	10% FrF				3	2	5	5	85				Marga	CL	11			
Rio Cayucupil en Cayucupil	50	50								40	60	70% FrF-Arc	30% FrF						5		10	85			Marga	SaC	15			
Rio Butamalal en Butamalal	65	30		5							100	97% FrF-Arc	10% FrF							2	8	90			Arcilla arenosa	SaC	8			
Rio Reputo en Reputo	70	20		10								100	90% FrF-Arc	10% FrF				10	5	15	10	60			Marga areno-arcillosa	SaC	15			
	F++	MUY FINA											Arc	ARCILLOSO																
	F+	MODERAMENTE FINA											Fr	FRANCOSO																
	F	FINA											Are	ARENOSO																
	M	MEDIA											Tr	TRUMAO																
	G	GRUESA											Ri	RIPIO																
	G+	MODERAMENTE GRUESA											Ro	ROCA																
	G++	MUY GRUESA											S	SAPROLITO																
													F	FINO																

d) Relación entre parámetros calibrados y geomorfología

A continuación, se evaluó la relación entre los parámetros calibrados y algunas características geomorfológicas de las cuencas, para determinar si por esta vía había alguna posibilidad de regionalización de los parámetros del modelo SIMED.

Los parámetros geomorfológicos evaluados fueron:

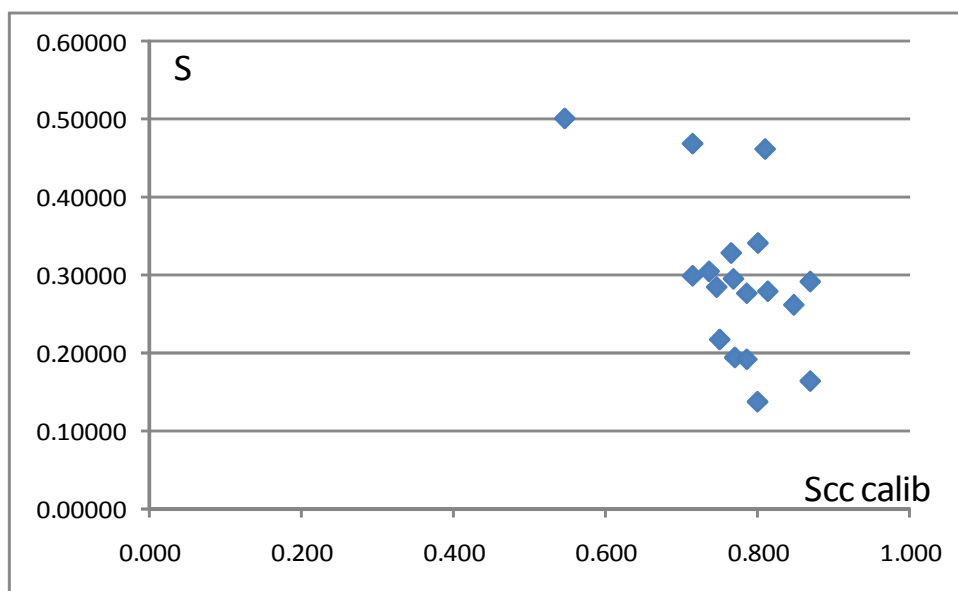
- la pendiente de Mociornita S

En el archivo “Elab Arch Calib.xls”, hoja “Tabla final y gráficos” del Anexo Digital 12.1 se graficaron las siguientes relaciones:

- S en función de scc calib, smin calib y smin calib
- S en función de Hcap calib y Hcap ini
- S en función de Hsuelo calib y Hsuelo ini
- S en función de K calib y K ini
- S en función de Khid calib y Khid ini.

No se pudo observar ninguna tendencia clara que permitiera identificar una correlación entre el comportamiento de los parámetros y la pendiente S de la cuenca. La Figura N° 35 ejemplifica lo señalado.

Figura N° 35
Pendiente de Mociornita S versus Scc calib



- El coeficiente orográfico Co, parámetro adimensional definido como

$$Co = H2 / A$$

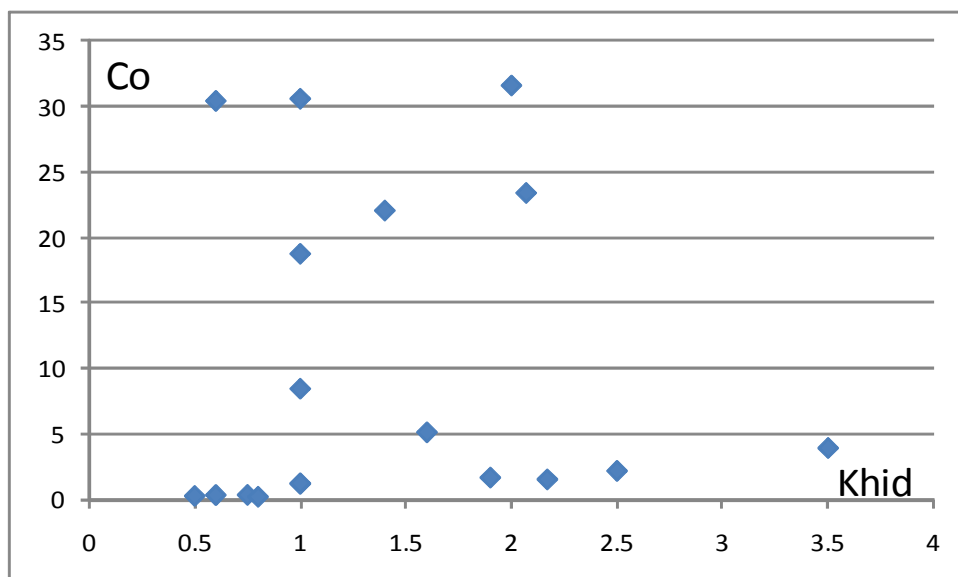
donde

H = desnivel entre el centro de gravedad de la cuenca y el punto de salida
 A = área de la cuenca

Las relaciones entre este parámetro y todos los parámetros resultantes de la calibración se presentan graficadas en el archivo Elab Arch Calib del Anexo Digital 11.1.

Lo que se puede observar es que en ninguna de las relaciones se puede identificar una correlación entre las variables graficadas. La Figura N° 36 ejemplifica lo señalado.

Figura N° 36
Coefficiente orográfico versus K hid



- **El coeficiente de compacidad Kc**, parámetro adimensional definido como

$$Kc = 0.28 p / \sqrt{A}$$

donde

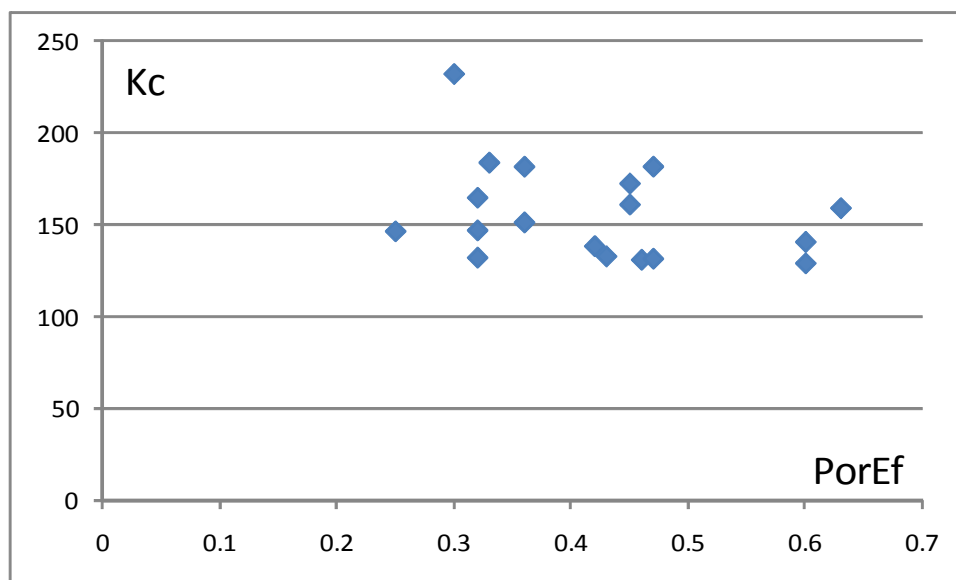
p = perímetro de la cuenca

A = área de la cuenca

Las relaciones entre este parámetro y todos los parámetros resultantes de la calibración se presentan graficadas en el archivo Elab Arch Calib del Anexo Digital 11.1.

Nuevamente se puede observar que en ninguna de las relaciones se puede identificar una correlación entre las variables graficadas. La Figura N° 37 ejemplifica lo señalado.

Figura N° 37
Coefficiente de compacidad en función de la porosidad efectiva



En conclusión, no fue posible encontrar una forma de correlacionar los parámetros de calibración con los parámetros geomorfológicos de las cuencas, de modo que tampoco hay posibilidad de una regionalización en base a este tipo de criterio.

e) Revisión de bibliografía específica

En la memoria de título “Calibración de modelos de escorrentía en cuencas pluviales”, realizada en 1992 por Bernarda Astudillo y dirigida por Ludwig Stöwhas, en la Universidad Técnica Federico Santa María, se intentó algo similar, esto es, encontrar la forma de obtener parámetros calibrados, que fuera posible regionalizar.

De esta memoria, conviene destacar aquí los siguientes aspectos:

Se trabajó con los modelos CICA y Brown y Ferrer, los cuales se calibraron para 11 cuencas entre Lliu Lliu y Bureo. Lo primero que se observa es que la calidad de la calibración no es la misma para todas las cuencas. En otras palabras, en algunas cuencas los modelos quedaron mejor calibrados que en otras, vista la precisión con que fue posible reproducir caudales medios mensuales y promedios anuales. El problema mayor es reproducir adecuadamente las crecidas.

Con respecto al parámetro A, éste tiene el mismo significado en ambos modelos, y coherentemente, los valores calibrados resultan similares para ambos. Lo interesante es

que se busca la explicación y la coherencia de este valor, comparando la precipitación puntual de la estación utilizada en la modelación, con los valores que entrega el mapa de isohietas para la cuenca completa. Se constata que el valor calibrado represente efectivamente la relación de precipitaciones entre la cuenca y la estación. Esto muestra que se considera que el valor A calibrado no debiera alejarse del valor que tiene la relación de precipitaciones cuenca/estación en la realidad.

Finalmente, se buscó regionalizar parámetros. Para ello, primero se efectuaron agrupaciones de las cuencas, para analizar si se podían relacionar entre ellas. Las agrupaciones se realizaron de acuerdo con cuatro criterios: Los parámetros calibrados, las características hidrológicas de las cuencas, las precipitaciones y los caudales. Al respecto, en el modelo CICA no se logró relacionar las agrupaciones según parámetros, con las agrupaciones según características hidrológicas, caudal y precipitación. Para el modelo Brown y Ferrer se logró identificar un cierto grado de relación entre las agrupaciones por parámetros, y las agrupaciones por características hidrológicas, caudal y precipitación.

En segundo lugar, y con el fin de sistematizar parámetros para transponerlos a cuencas sin control fluviométrico, se estudiaron dos alternativas:

- determinar parámetros promedio de agrupaciones efectuadas según el criterio de latitud y verificar su validez en una cuenca del grupo escogida al azar. Se definieron 4 grupos.
- determinar parámetros promedio de agrupaciones efectuadas según el criterio de precipitación anual, y verificar su validez en una cuenca del grupo escogida al azar. Se definieron 3 grupos.

Como resultado, en el primer caso se obtuvo que, para ninguno de los dos modelos, los parámetros promedio permiten reproducir bien las características de las estadísticas observadas del propio grupo. Esto era de esperarse, porque incluso dentro de cada grupo, los parámetros varían mucho.

En el segundo caso, los parámetros promedio aplicados a cuencas escogidas de los diversos grupos entregan valores adecuados, para los grupos de precipitaciones más altas. Para el grupo de precipitaciones bajas, los resultados son deficientes para ambos modelos.

f) Regionalización de parámetros calibrados en base a criterios hidrológicos

Debido a que no se pudo encontrar ninguna forma de regionalización de los parámetros calibrados de las maneras descritas, la Inspección Fiscal de la DGA efectuó una sugerencia en el sentido de captar alguna similitud entre cuencas que se manifestara a través del régimen hidrológico de las diversas estaciones. Con el objetivo de poder encontrar una forma de regionalizar los parámetros del modelo, se procedió a efectuar el análisis que se describe a continuación.

i) Clasificación de cuencas según curvas de frecuencia de caudal diario

En primer lugar, se trató de agrupar las cuencas estudiadas de acuerdo con criterios de similitud hidrológica, de modo de encontrar características similares en los parámetros calibrados que permitieran una regionalización de ellos.

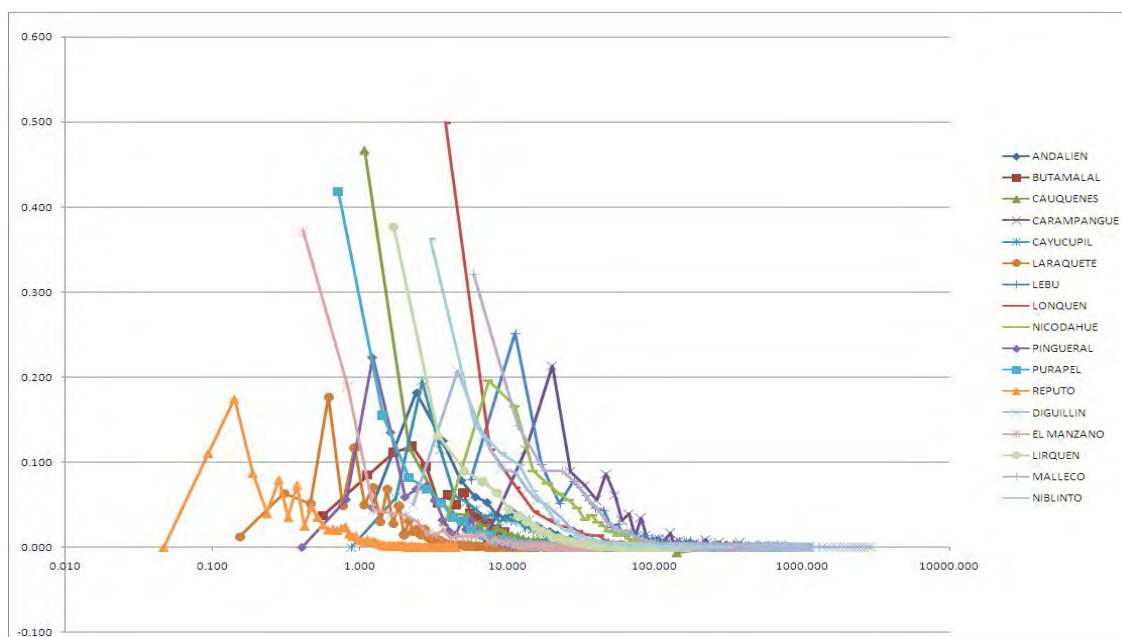
Para ello se representó la frecuencia de ocurrencia de los caudales observados en el punto de salida de cada cuenca, en días, en función del valor del caudal.

Como se puede observar en la siguiente Figura N° 38, se distinguen dos tipos de curvas:

- el primer tipo de curva corresponde una exponencial de exponente negativo, que se observa en cuencas donde la mayoría de los caudales son bajos y la frecuencia va decreciendo cuando el valor del caudal crece; pues la curva no presenta máximo. Este primer tipo corresponde en forma gruesa a las cuencas cordilleranas y costeras del norte de la zona de estudio. Ellas forman lo que se llamó el grupo 1.
- el segundo tipo de curva se aproxima a la distribución log-normal en forma de campana y presenta un máximo. Este segundo tipo corresponde a las cuencas costeras del sur de la zona de estudio, y forman el grupo 2.

Ambos grupos se identifican en el Cuadro N° 35.

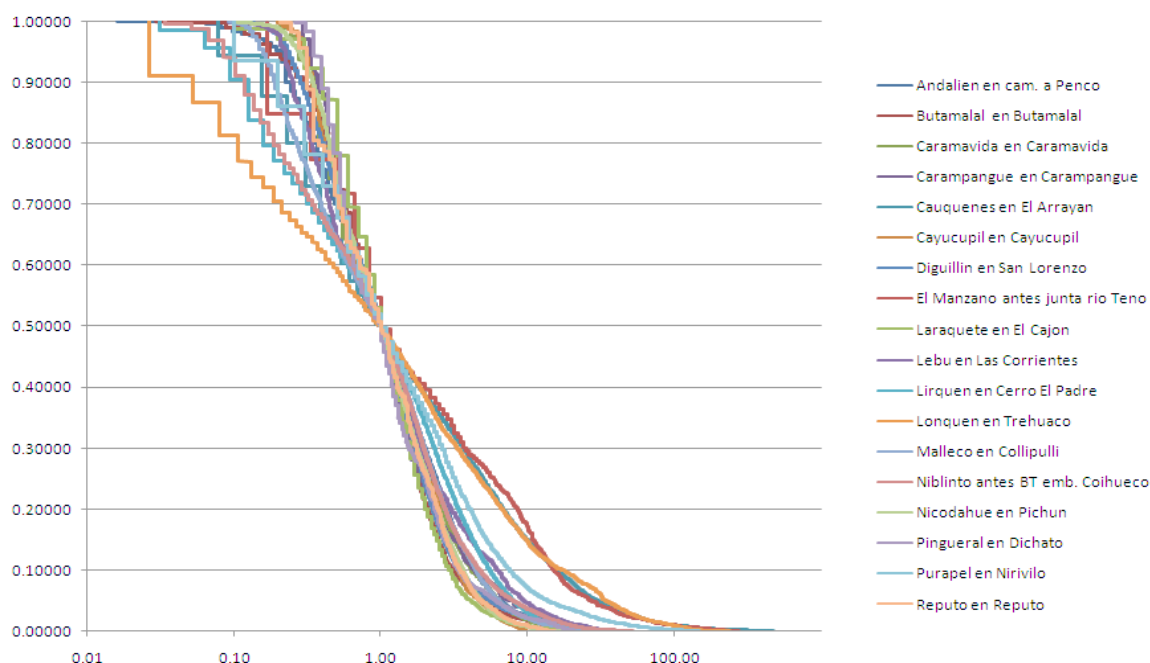
Figura N° 38
Curvas de frecuencia de las estaciones estudiadas



ii) *Clasificación de cuencas según curvas de duración de caudal diario*

Posteriormente se intentó agrupar las cuencas de acuerdo con el comportamiento de sus curvas de duración. El grupo completo de estas curvas se muestra en la Figura N° 39, en la cual se puede observar que hay tres que se diferencian levemente del resto, y son las que pertenecen al grupo 1 antes identificado. Es decir, nuevamente se identifican dos grupos al observar las curvas de duración. Ambos grupos se presentan en el Cuadro N° 35.

Figura N° 39
Curvas de duración de las estaciones estudiadas



iii) **Clasificación de cuencas según apreciación visual de los hidrogramas**

Para complementar el análisis anterior, se trató de clasificar visualmente los hidrogramas de los caudales observados de cada cuenca. Por eso se definieron los siguientes tres criterios, cada uno evaluado por una cifra entre 1 y 5.

- Criterio “Proporción Crecida-Flujo-Base (FB)” (parámetro A): evalúa la importancia relativa del caudal máximo de las crecidas en función del valor del FB en el mismo momento; mientras más importante la crecida, más grande el valor.

- Criterio “Densidad de Crecidas” (parámetro Khid): evalúa la definición de la señal o la frecuencia del ruido de las crecidas por sobre la señal del flujo base; mientras más importante la frecuencia, más grande el valor.
- Criterio “Decaimiento recesión” (parámetro K): evalúa la pendiente de las curvas de recesiones después de las crecidas y del flujo base en tiempo de estiaje; mientras más grande la pendiente de la curva de recesión, más grande el valor.

Como resultado de este análisis, se pudieron distinguir 4 grupos distintos:

- Grupo A: corresponde a estaciones con valores altos de los tres criterios: son cuencas donde se observan eventos bruscos y frecuentes, y donde casi no se observa onda de flujo base.
- Grupo D: corresponde a estaciones con valores bajos de los tres criterios: son cuencas donde se observa un flujo base importante durante todo el año y con eventos menos frecuentes y de amplitud moderada.
- Grupo B: se aproxima al Grupo A pero se caracteriza por tener recesiones más lentas; el flujo base sigue importante hasta la temporada de lluvia siguiente.
- Grupo C: se aproxima al Grupo D pero se caracteriza por tener crecidas muy frecuentes aunque moderadas durante la temporada de lluvia.

Los resultados de este análisis se encuentran también en el Cuadro N° 35.

iv) Clasificación de cuencas según rangos de precipitación

Finalmente se buscó agrupar las cuencas de acuerdo con el monto de la precipitación media anual, y se llegó a identificar los mismos grupos antes identificados.

v) Definición de parámetros de calibración por grupo

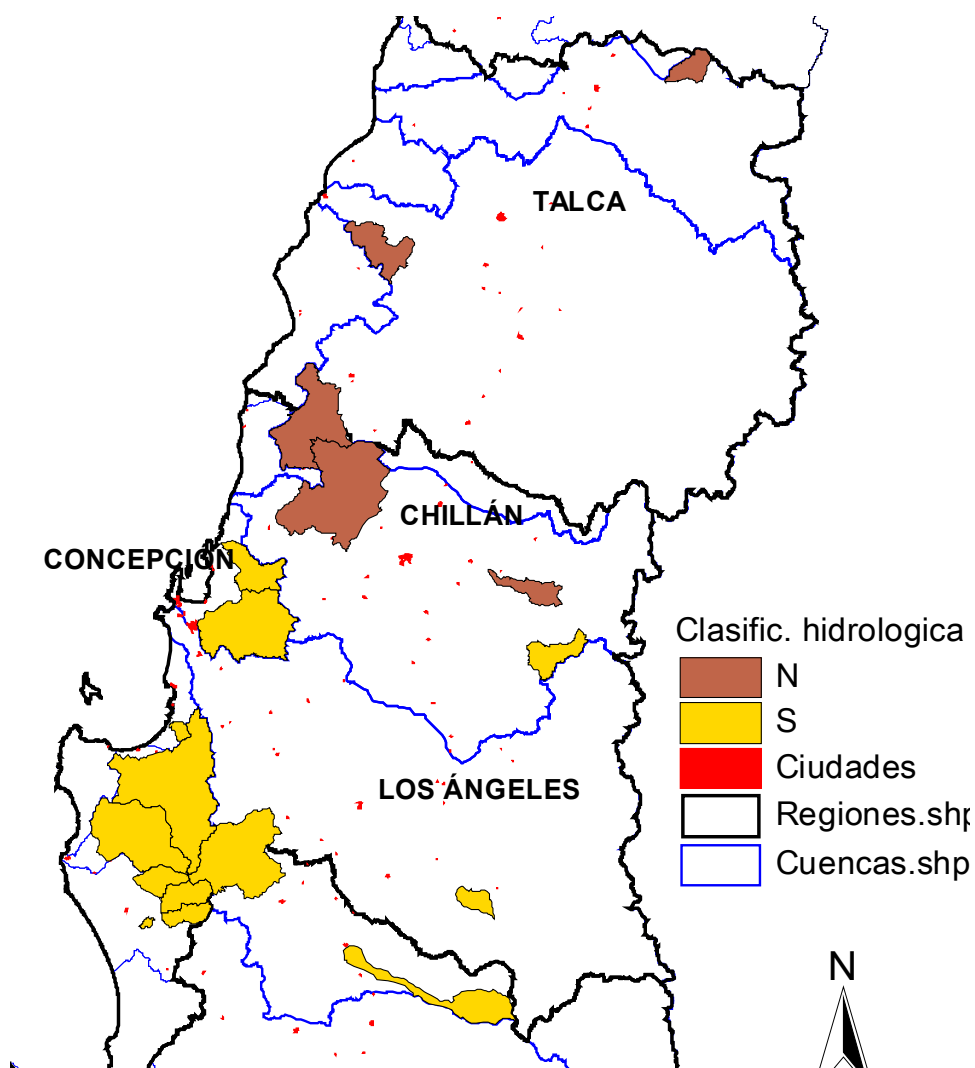
Los resultados de los análisis efectuados de acuerdo con los cuatro criterios hidrológicos señalados, se presentan en el Cuadro N° 35 siguiente.

Cuadro N° 35 Agrupación de estaciones según criterios hidrológicos

Estación fluviométrica / Cuenca	Dens. Crecidas	Proporc.Crecidas-F.B.	Reces.lenta/rápida	Visual	Curva f(Q)	Curva D (Q)	Prec. Anual (mm)	Grupo
Río Cauquenes El Arrayán	4.0	5.0	5.0	A	1	1	Pp<1000	N
Río Lonquén en Trehuaco	4.0	5.0	5.0	A	1	1	Pp<1000	N
Río Purapel en Nirivilo	3.0	4.0	5.0	A	1	1	Pp<1000	N
Est. El Manzano antes junta Río Teno	3.0	4.0	4.5	A	1	2	Pp>2000	N
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	4.0	4.0	3.5	A/B	1	2	Pp>2000	N
Río Diguillín en San Lorenzo	4.0	4.0	2.0	B	2	2	Pp>2000	S
Río Butamalal en Butamalal	4.0	3.5	2.0	B	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Lirquén en Cerro El Padre	5.0	3.0	3.0	C	1	2	Pp>2000	S
Río Malleco en Collipulli	4.0	3.0	3.0	C	1	2	1000<Pp<2000	S
Río Andalien camino a Penco	4.0	3.0	2.0	C	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Lebu en Las Corrientes	4.0	3.0	2.0	C	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Caramávida en Caramávida	3.5	3.0	2.0	C	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Laraquete en el cajón	2.0	2.5	2.0	D	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Pingüeral en Dichato	2.0	2.0	2.5	D	2	2	Pp<1000	S
Río Nicodahue en Pichún	4.0	2.0	2.0	C	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Carampangue en Carampangue	2.0	2.0	2.0	D	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Cayucupil en Cayucupil	4.0	2.0	2.0	C	2	2	1000<Pp<2000	S
Río Reputo en Reputo	2.0	1.0	2.0	D	2	2	1000<Pp<2000	S

La Figura N° 40 presenta la ubicación de las cuencas según grupo N y S.

Figura N° 40
Agrupación de estaciones según criterios hidrológicos



En base al resultado del agrupamiento anterior, se trató de asociar los parámetros calibrados con los grupos identificados. Al respecto, se observa lo siguiente:

Los grupos 1 y A se caracterizan de forma muy clara por:

- valor del parámetro A chico ~ 0.620
- valor del parámetro Khid chico ~ 0.640 mm/ horas
- valor del parámetro K chico ~ 440 horas
- valor del parámetro Hsuelo grande ~ 200 mm
- valor del parámetro Hcap grande ~ 1030 mm

Corresponden a las cuencas controladas por las estaciones Cauquenes en El Arrayán, Lonquén en Trehuaco, Purapel en Nirivilo, El Manzano antes junta Teno y Niblinto antes BT embalse Coihueco.

Además correspondan por lo general a cuencas con monto de precipitación anual bajo (<1000 mm), salvo las cuencas cordilleranas El Manzano antes junta con río Teno y Niblinto antes BT embalse Coihueco.

Geográficamente, estas 5 cuencas, 3 costeras y 2 cordilleranas, corresponden a la zona Norte Costa de la zona de estudio. Formarán el grupo denominado Norte.

Observando los valores de los parámetros calibrados, no se pueden asociar zonas geográficas a cada uno de los grupos B, C y D. Por lo tanto, todas las otras cuencas formaron un mismo grupo denominado Sur.

En contraste al grupo Norte, este conjunto Sur se caracteriza por:

- valor del parámetro A más grande ~1.050
- valor del parámetro Khid más grande ~1.290 mm/ horas
- valor del parámetro K más grande ~1360 horas
- valor del parámetro Hsuelo más chico ~200 mm
- valor del parámetro Hcap chico ~360 mm

Además se caracteriza de forma general por un monto anual de precipitaciones mayores a aquellas observadas en las cuencas del grupo Norte (>1000 mm).

vi) **Simulación 1, con los sets de parámetros promedio Norte y Sur**

Como primer intento de regionalización de parámetros, se procedió a una simulación de todas las estaciones, ocupando un set de valores de parámetros común para todas las estaciones de un mismo grupo (Norte y Sur), y se evaluó la pérdida en calidad de la calibración.

Los sets que se ocuparon fueron los siguientes, calculados como promedio de los sets de valores de parámetros de todas las cuencas incluidas en el grupo.

Cuadro N° 36
Set de parámetros Grupo Norte

Parámetro	Valor
Cisy[°/1]	0.620
Cevap[°/1]	0.380
PorEf[°/1]	0.420
Hcap[mm]	1030.000
Khid[mm/hr]	0.640
Scs[°/1]	0.770
Scrit[°/1]	0.650
Smin[°/1]	0.290
Hsuelo[mm]	200.000
K[hr]	440.000

Cuadro N° 37
Set de parámetros Grupo Sur

Parámetro	Valor
Cisy[°/1]	1.050
Cevap[°/1]	0.510
PorEf[°/1]	0.390
Hcap[mm]	360.000
Khid[mm/hr]	1.290
Scs[°/1]	0.800
Scrit[°/1]	0.650
Smin[°/1]	0.550
Hsuelo[mm]	60.000
K[hr]	1360.000

Para evaluar la calidad de la simulación, en cada estación simulada se volvió a calcular el coeficiente de Nash-Sutcliffe, y también se efectuó una evaluación visual de la simulación. En el siguiente Cuadro N° 38 se encuentran resumidos los resultados de esta nueva simulación. Este cuadro también se entrega en el archivo 12.2.2 Coef Nash Resumen.xls del Archivo Digital.

Al respecto, se puede observar que, con estos nuevos parámetros, quedaron bien reproducidas las estaciones del grupo Norte: Purapel en Nirivilo, Cauquenes en El Arrayán y El Manzano, y del grupo Sur: Diguillín en San Lorenzo, Laraquete en El Cajón, Lebu en Las Corrientes, Caramávida en Caramávida y Butamalal en Butamalal.

Regularmente bien reproducidas quedaron las estaciones Niblinto del grupo Norte, y Pingüeral en Dichato, Nicodahue en Pichún, Lirquén en Cerro El Padre y Lebu en Las Corrientes, del grupo Sur.

Mal reproducidas quedaron las estaciones Lonquén en Trehuaco del grupo Norte, y Andalién camino a Penco, Carampangue en Carampangue, Cayucupil en Cayucupil, Reputo en Reputo y Malleco en Collipulli, del grupo Sur.

En resumen, se observa que una regionalización de los parámetros calibrados, basada en criterios hidrológicos, no entrega resultados aceptables sistemáticos, por lo cual

estos parámetros regionales deben considerarse iniciales, y necesariamente sujetos a calibración.

Cuadro N° 38
Coefficiente de Nash-Sutcliffe y resultado de la apreciación visual
Simulación con parámetros promedio

Estación fluviométrica / Cuenca	Coeficiente de Nash-Sutcliffe		Coeficiente de Nash-Sutcliffe SIM 1		Efecto SIM 1 en CNS			Apreciación visual SIM 1
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	%			
Est. El Manzano antes junta Río Teno	0.281	0.406	0.354	0.456	19	0.123	+	OK en general, crecidas altas ppio de invierno
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	0.631	0.448	0.538	0.366	-17	-0.176	~	FB bajo, crecidas altas
Río Diguillín en San Lorenzo	0.410	0.435	0.402	0.381	-7	-0.061	~	OK en general, crecidas no bien ajustadas
Río Purapel en Nirivilo	0.479	-0.213	0.442	-0.847	-153	-0.671	~	OK en general, FB no muy bien ajustado y...
		0.520		0.598	15	0.078	~	 Crecidas altas en años secos
Río Cauquenes El Arrayan	0.453	0.380	0.442	0.348	-5	-0.042	~	OK en general, FB un poco bajo en temporada lluvia
Río Lirquén en Cerro El Padre	0.437	0.412	0.035	0.348	-54	-0.467	-	OK, crecidas altas
Río Malleco en Collipulli	0.540	0.447	-0.585	-0.603	-222	-2.175	-	FB alto en recesiones, crecidas altas
Río Lonquén en Trehuaco	0.171	0.183	0.240	0.358	69	0.245	+	FB alto, crecidas altas en años secos
Río Pingueral en Dichato	-0.344	-	-2.161	-	-527	-1.816	-	FB OK, crecidas altas
Río Nicodahue en Pichún	0.579	0.327	-2.088	-2.846	-715	-5.840	-	FB OK, crecidas muy altas
Río Andalien camino a Penco	0.006	-0.345	-3.129	-2.736	-26093	-5.526	-	Crecidas y FB exagerados, falta definición
Río Laraquete en el cajón	0.054	-0.370	0.028	-0.310	-16	0.033	~	OK
Río Carampangue en Carampangue	0.114	-	0.052	-	-54	-0.062	~	FB y crecidas bajas
Río Lebu en Las Corrientes	0.140	0.208	0.138	0.070	-34	-0.140	~	FB OK, crecidas no bien ajustadas
Río Caramávida en Caramávida	-0.115	0.161	0.170	0.445	211	0.568	+	FB y crecidas bien simulados, faltan algunas crecidas
Río Cayucupil en Cayucupil	0.085	0.139	0.393	0.420	284	0.589	+	FB bajo en temp. Lluvia, faltan algunas crecidas
Río Butamalal en Butamalal	0.176	0.051	0.224	0.093	55	0.089	~	FB muy bien simulado, faltan algunas crecidas
Río Reputo en Reputo	0.526	0.548	0.192	0.085	-74	-0.797	-	FB y crecidas altas

vii) **Simulación 5**

En esta simulación se usaron los parámetros de los dos grupos Norte y Sur determinados anteriormente, con excepción de los parámetros A y B. La diferencia con la Simulación 1 radica en que se usaron los valores de A y B propios de cada cuenca, pensando que podría mejorar la calidad general de las simulaciones. Para el parámetro K, se usó el valor promedio del grupo.

Los sets de parámetros aplicados en esta simulación se encuentran en los Cuadros N° 37 y 37, con excepción de los parámetros A y B, que son individuales.

Esta simulación tuvo los siguientes resultados:

La reproducción de caudales fue buena en las estaciones Butamal en Butamalal (S), Nicodahue en Pichún (S), Lonquén en Trehuaco (N) y Diguillín en San Lorenzo (S). .

Fue regular para las estaciones Cauquenes en El Arrayan (N), Cayucupil en Cayucupil (S), Laraquete en el Cajón (S) y Reputo en Reputo (S)

Fue deficiente para las estaciones Purapel en Nirivilo (N), Caramávida en Caramávida (S) Pingueral en Dichato (S), Niblinto antes BT embalse Coihueco, Malleco en Collipulli y Lirquén en cerro El Padre.

Por falla interna del modelo SIMED durante el cálculo, no se pudieron calcular las cuencas controladas por las estaciones Andalién en Camino a Penco (Calib), Carampangue en Carampangue (Calib y Valid), Lebu en Las Corrientes (Calib y Valid), Lonquén en Trehuaco (Valid) y Manzano antes Junta Teno.

Este resultado muestra que con usar los valores calculados de A y B en vez de valores promedio, no se logra una mejora de las simulaciones. Esto significa que tampoco son regionalizables los parámetros calibrados bajo estas consideraciones, por lo que deben considerarse parámetros iniciales, y luego ser calibrados.

viii) **Simulación 6**

Es una variante de la simulación 5, en la cual las estaciones Andalién y Pingueral se cambiaron del grupo sur al grupo norte, para analizar si quedaban mejor representadas con el set de parámetros correspondiente al grupo norte. Se observó que no mejoraron por este concepto.

De acuerdo con todo el trabajo realizado y expuesto, se puede apreciar que, bajo una mirada de percepción hidrológica del comportamiento de los caudales, tampoco fue posible reconocer patrones que permitieran regionalizar los parámetros calibrados del modelo.

g) Caracterización de los grupos en función de las características de suelos de las cuencas

En esta etapa, se volvió a buscar alguna relación entre las características del suelo obtenidas de CIREN, como textura, profundidad, granulometría, capacidad de uso, y los parámetros promedio de los nuevos grupos formados en base a los análisis hidrológicos realizados, pero se observa que los grupos no se reflejan con características homogéneas en las tablas de suelos (Anexo 10, Cuadro 10.5 Cálculo Parám. Suelo hoja suelos CIREN).

h) Comentario final respecto de la regionalización de los parámetros calibrados

Según se puede observar de todo el análisis realizado, a partir de los parámetros calibrados no fue posible encontrar una forma de regionalización que permitiera reproducir bien o razonablemente bien todas las estaciones de la región o zona considerada. La razón última de este hecho se atribuyó a que la definición inicial de los parámetros puede ser mejorada.

Por esta razón, se decidió recomenzar el análisis, aplicando una nueva forma de definir parámetros iniciales, mejor relacionados con la variable física que representan. En especial, se trató de que los parámetros de suelo fueran más representativos de los suelos existentes, de modo de tener una base física sobre la cual extrapolar estos parámetros.

El análisis realizado se presenta a continuación.

12.3 REGIONALIZACIÓN SEGÚN PARÁMETROS INICIALES

Debido a los resultados anteriores obtenidos para los parámetros calibrados, se continuó con el análisis, buscando ahora asociar parámetros iniciales con alguna de las características hidrológicas, físicas o de suelo de las cuencas, de modo de intentar una regionalización de ellos.

Al respecto, cabe recordar que los parámetros iniciales determinados de acuerdo con la metodología propuesta, no entregan buenas reproducciones de las estadísticas de caudal en las estaciones seleccionadas. La reproducción de las estadísticas observadas con el SIMED aplicando los parámetros iniciales, se muestra en la carpeta 12.3.1 Simulaciones con parámetros iniciales originales, del Anexo Digital.

En el Cuadro N° 39 adjunto, se presenta el resultado de la apreciación visual de la bondad del ajuste para las simulaciones.

Cuadro N° 39
Resultado del ajuste con parámetros iniciales, según apreciación visual

Estación fluviométrica / Cuenca	Apreciación visual	Aceptabilidad
Est. El Manzano antes junta Río Teno	Crecidas no representadas / FB alto en general	NO
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	FB OK en general / Crecidas mal representadas (bajas)	~
Río Diguillín en San Lorenzo	Crecidas no representadas / FB alto en general	NO
Río Purapel en Nirivilo	Crecidas no representadas / FB y recesiones MUY altos	NO
Río Cauquenes El Arrayan	Forma y crecidas bien representadas / Recesiones altas	NO
Río Lirquén en Cerro El Padre	Forma y crecidas bien representadas / Recesiones altas	~
Río Malleco en Collipulli	Recesiones altas / Crecidas bajas	~
Río Lonquén en Trehuaco	Recesiones OK / Crecidas abusivas en otoño y años secos	NO
Río Pingueral en Dichato	FB y recesiones OK / Crecidas MUY altas	NO
Río Nicodahue en Pichún	FB y recesiones OK / Crecidas altas	SI
Río Andalien camino a Penco	Problemas de simulación	
Río Laraquete en el cajón	FB y recesiones OK / Crecidas NO representadas	NO
Río Carampangue en Carampangue	Problemas de simulación	
Río Lebu en Las Corrientes	Problemas de simulación	
Río Caramávida en Caramávida	FB y recesiones altas / Crecidas un poco altas	NO
Río Cayucupil en Cayucupil	OK en general / Crecidas un poco altas	SI
Río Butamalal en Butamalal	FB y recesiones bajas / Crecidas MUY altas	NO
Río Reputo en Reputo	Recesiones OK / FB un poco alto / Crecidas altas	SI

Debido a ello, los parámetros fueron modificados durante la calibración, con el resultado arriba señalado. Muchos de ellos abandonaron los rangos físicos preestablecidos con la metodología, otros se alejaron mucho de un valor físico esperado.

Este hecho hizo pensar en encontrar un nuevo set de parámetros iniciales, a partir de su sentido físico, que fuera posible calibrar, y no sólo eso, sino que también entregara valores calibrados no tan alejados de su valor original. Para ello, se procedió como se señala en lo que sigue de este informe, con los resultados enunciados al final.

a) Definición de grupos de cuencas en función de sus características de textura de suelo

Para la determinación de parámetros iniciales se procedió a partir de las características del suelo, obtenidas de las coberturas de suelos de CIREN. Así, se definió para cada cuenca un tipo de suelo representativo, incluso para la cuenca Diguillín en San Lorenzo que no está cubierta por estas coberturas, pero que se asimiló a las cuencas cordilleranas, lo que permitió agrupar las cuencas en tres tipos:

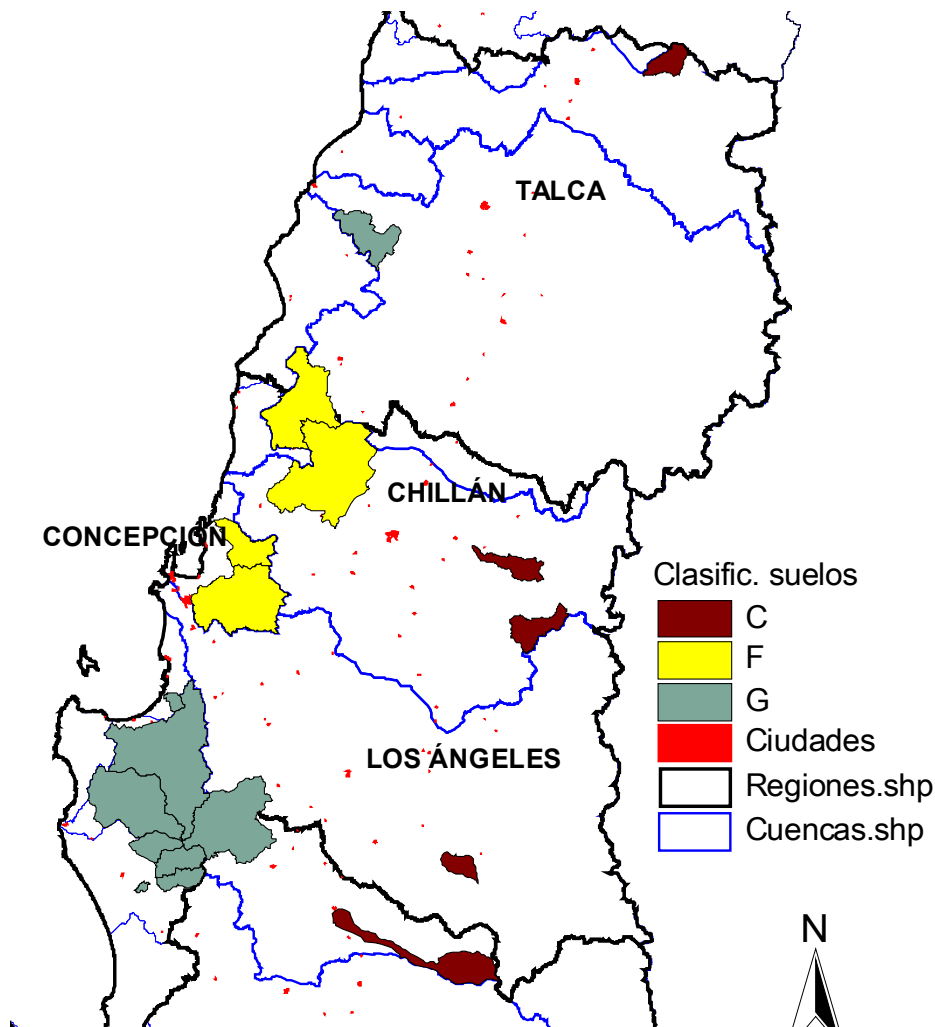
- las cuencas cordilleranas (grupo C) que corresponden a suelos gruesos de alto contenido en porción Francosa-Rocosa y Trumao (Est. El Manzano antes junta Río Teno, Niblinto antes BT emb. Coihueco, Lirquén en Cerro El Padre, Malleco en Collipulli y Diguillín en San Lorenzo).
- las cuencas costeras que corresponden a suelos de textura más fina (grupo F) con porción arcillosa importante (Río Lonquén en Trehuaco, río Pingueral en Dichato, río Cauquenes en El Arrayan, río Andalién en camino a Penco).
- las cuencas costeras que corresponden a suelos de textura más gruesa (grupo G) con menor porción arcillosa (Río Purapel en Nirivilo, río Nicodahue en Pichún, río Laraquete en El Cajón, río Carampangue en Carampangue, río Lebu en Las Corrientes, río Caramávida en Caramávida, río Cayucupil en Cayucupil, río Butamalal en Butamalal, río Reputo en Reputo).

Cuadro N° 40
Clasificación de cuencas por tipo de suelo

Estación fluviométrica / Cuenca	Grupo	Tipo de suelo
Río Cauquenes El Arrayan	N	F
Río Lonquén en Trehuaco	N	F
Río Purapel en Nirivilo	N	G
Est. El Manzano antes junta Río Teno	N	C
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	N	C
Río Diguillín en San Lorenzo	S	?
Río Butamalal en Butamalal	S	G
Río Lirquén en Cerro El Padre	S	C
Río Malleco en Collipulli	S	C
Río Andalién camino a Penco	S	F
Río Lebu en Las Corrientes	S	G
Río Caramávida en Caramávida	S	G
Río Laraquete en el cajón	S	G
Río Pingueral en Dichato	S	F
Río Nicodahue en Pichún	S	G
Río Carampangue en Carampangue	S	G
Río Cayucupil en Cayucupil	S	G
Río Reputo en Reputo	S	G

La distribución espacial de las cuencas de tipo C, F y G se presenta en la Figura N° 41, adjunta.

Figura N° 41
Distribución espacial de cuencas según tipo de suelo C, F y G



Para cada grupo de cuencas (F, G, C), se determinó un set inicial de parámetros de suelo (scc, smin, scrit, Hsuelo, Hcap y Khid) de la siguiente forma:

Ocupando la tabla p 117 de “Hidrología Aplicada” de V.T. Show, se determinaron los valores Hcap y Por Ef además de un valor de Khid aproximado. Los valores de scc, smin y scrit se determinaron a partir de las tablas de la hoja “scc smin scrit” del archivo 12.3 Regionalización, del Anexo Digital. Dichas tablas fueron facilitadas por el Ing. Pablo Isensee, y sus fuentes son “Hidrología Aplicada” de V.T. Show y Apuntes de Hidráulica profesor Rubén León.

Los sets de valores para los parámetros de suelo resultantes se encuentran en el Cuadro N° 41.

Posteriormente, y en la medida que las estaciones lo requirieran, se modificaron los parámetros iniciales, para intentar mejorar las simulaciones. Todos los sets adicionales probados, se presentan también en el Cuadro N° 41. En este cuadro se agregan, a modo de comparación, los sets de parámetros calibrados Norte y Sur, con los que anteriormente no se logró una regionalización.

En cada una de las nuevas simulaciones, se generaron para ambos periodos (Calibración y Validación) los gráficos comparados entre el caudal simulado promediado mensualmente y el caudal observado promediado mensualmente. Además se graficaron ambas series en un diagrama XY, representando para cada mes los valores calibrados en abscisas y los valores simulados en ordenadas. Todos estos gráficos se encuentran también en Anexo Digital, en el archivo 12.3.2 Regionalización.

Cuadro N° 41
Sets de parámetros iniciales de suelo por grupo

	Set C	Set C+	Set G	Set G+	Set F	Norte calib	Sur calib
PorEf[°/1]	0.4	0.42	0.36	0.45	0.31	0.42	0.39
Hcap[mm]	100	50	170	100	250	1030	360
Khid[mm/hr]	7.5	120	2.5	4	1.2	0.62	1.29
Scc[°/1]	0.25	0.2	0.6	0.6	0.8	0.77	0.8
Scrit[°/1]	0.13	0.1	0.39	0.36	0.69	0.64	0.65
Smin[°/1]	0.05	0.04	0.25	0.2	0.35	0.29	0.55
Hsuelo[mm]	200	100	500	300	500	200	60
K[hr]	*	*	*	*	*	440	1360

Nota: el asterisco frente a K significa que se usó como valor inicial el valor propio de cada estación en este análisis.

A continuación se presenta el resultado de las 4 simulaciones adicionales efectuadas, que se llamaron 2, 3, 4 y 7.

Simulación 2

En esta simulación se generaron las estadísticas de caudales diarios simulados para todas las cuencas, ocupando para cada cuenca el set de valores de parámetros de suelo correspondiente (C, F y G). Para cada cuenca se ocuparon además como valores de los parámetros A, B y K sus valores individuales iniciales calculados según se presenta en el estudio.

Esta simulación llevó a buenos resultados para las 5 estaciones siguientes: Malleco en Collipulli (C), Diguillín en San Lorenzo (C), Cauquenes en El Arrayán (F), Cayucupil en Cayucupil (G), Nicodahue en Pichún (G) y Butamalal en Butamalal (G).

El resultado de la simulación se considera regular para las 3 estaciones siguientes: Niblinto antes BT emb. Coihueco (C) y Reputo en Reputo (G).

El resultado no fue satisfactorio en las estaciones Purapel en Nirivilo (G), Laraquete en El Cajón (G), Caramávida en Caramávida (G), Lonquén en Trehuaco (F) y Pingüeral en Dichato (F).

Por falla interna del modelo SIMED durante el cálculo, no se pudieron simular las cuencas controladas por las estaciones Andalién en Camino a Penco (Calib y Valid), Carampangue en Carampangue (Calib y Valid), Lebu en Las Corrientes (Calib y Valid) y Lonquén en Trehuaco (Valid).

Lo señalado muestra que esta forma de determinar parámetros iniciales no garantiza una buena reproducción de caudales, por lo cual ellos deben ser necesariamente calibrados antes de confiar en los caudales sintetizados.

Se intentó calibrar la estación Purapel en Nirivilo, ajustando los parámetros B, K, Khid, Hsuelo y Hcap, sin mover el parámetro A, pero no fue posible. No se llegó a reproducir satisfactoriamente la estadística observada.

Simulación 3

En esta etapa, intentando mejorar las simulaciones en las estaciones Pingüeral en Dichato y Laraquete en El Cajón, ambas se asociaron a otro tipo de suelo: F a G y G a F respectivamente, cambiando sus set de parámetros respectivos.

No se observó ninguna mejora en la calidad de los hidrogramas simulados.

Simulación 4

En esta etapa, y con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos en la Simulación 2, se usaron parámetros correspondientes a suelos más gruesos tanto para las cuencas cordilleranas como costeras gruesas, generando los set de valores de parámetros de suelo respectivos Set C+ y Set G+, según la misma metodología antes expuesta.

Estos valores se presentan en el Cuadro N° 41, Sets de parámetros iniciales de suelo por grupo, presentado más arriba.

No se observó ninguna mejora para las cuencas cordilleranas (Set G+) ni tampoco para las estaciones costeras de suelo grueso (Set G+) Andalién en Camino a Penco, Caramávida en Caramávida y Butamalal en Butamalal, de manera que no se siguió simulando para las demás cuencas.

Por falla interna del modelo SIMED durante la simulación, no se pudieron simular las cuencas controladas por las estaciones Andalién en Camino a Penco (Calib), Carampangue en Carampangue (Calib y Valid), Lebu en Las Corrientes (Calib y Valid).

Esta simulación muestra que los nuevos parámetros tampoco garantizan una buena reproducción de los valores observados, sin pasar por una calibración.

Calibración o Simulación 7

En esta simulación se buscó calibrar las estaciones peor reproducidas con los parámetros iniciales de la simulación 2, tratando de mover los parámetros de suelo en lo posible dentro de sus rangos físicos, o manteniéndolos dentro de valores razonables, y permitiendo mover también los valores calculados A, B y K dentro de un rango razonable (20-30% del valor calculado).

Las estaciones peor reproducidas en la simulación 2 fueron las siguientes: Purapel en Nirivilo, Laraquete en El Cajón y Caramávida en Caramávida.

Las tres estaciones fue posible calibrarlas moviendo algunos de los parámetros A, K, Khid, Hsuelo y/o Hcap.

Lo señalado muestra que los parámetros iniciales de suelo, determinados por una metodología simplificada, en combinación con los parámetros A, B y K calculados, entregan un buen set de parámetros iniciales para generación sintética de caudales, los que, sin embargo, necesariamente deben pasar por un proceso de calibración en una estación lo más cercana posible, antes de asumir los caudales generados como aceptables.

A continuación, en la Figura N° 42, se presenta el resultado de clasificación de cuencas en grupos C,F y G según tipo de textura de suelos, en conjunto con la cobertura regional de suelos de CIREN.

Finalmente, se agrega el Cuadro N° 42, con todas las simulaciones adicionales, realizadas con los parámetros originales, iniciales y calibrados, y con los parámetros de obtención simplificada, que se usaron como parámetros iniciales.

Cuadro N° 42
Resumen de simulaciones adicionales
Realizadas con parámetros originales calibrados e iniciales, y con nuevos parámetros iniciales

Estación fluviométrica / Cuenca	Granulometría			OBSERV.	Simul 2	Simul 3	Simul 4	Simul 5	Simul 6	Simul 7
Est. El Manzano antes junta Río Teno	35% Fr-Ro	3% Tr	1% FrF	60% AFUERA	C		C+	Norte		
Río Niblinto antes BT. Emb. Coihueco	15% Tr	2% Tr-Arc	2% Fr-Arc	50% AFUERA	C		C+	Norte		
Río Diguillín en San Lorenzo				100% AFUERA	C			Sur		
Río Lirquén en Cerro El Padre	40% Tr				C		C+	Sur		
Río Malleco en Collipulli	40% Tr	15% Arc	5% Arc-S		C		C+	Sur		
Río Cauquenes El Arrayan	55% FrF-Arc	30% Arc	10% FrF	5% FrF-Ri	F			Norte		
Río Lonquén en Trehuaco	60% Arc	30% FrF-Arc	5% FrF		F			Norte		
Río Pingueral en Dichato	80% FrF	20% Arc			F	G		Sur	Norte	
Río Andalien camino a Penco	55% FrF	40% Arc			F		G+	Sur	Norte	
Río Purapel en Nirivilo	60% FrF-Arc	40% FrF			G			Norte		G
Río Nicodahue en Pichún	50% FrF-Arc	30% FrF	10% Arc	5% Arc	G			Sur		
Río Laraquete en el cajón	100% FrF-Arc				G	F		Sur		G
Río Carampangue en Carampangue	60% FrF	40% FrF-Arc			G			Sur		
Río Lebu en Las Corrientes	85% FrF-Arc	10% FrF	5% Arc-FrF		G			Sur		
Río Caramávida en Caramávida	90% FrF-Arc	10% FrF			G		G+	Sur		G
Río Cayucupil en Cayucupil	70% FrF-Arc	30% FrF			G			Sur		
Río Butamalal en Butamalal	97% FrF-Arc	10% FrF			G		G+	Sur		
Río Reputo en Reputo	90% FrF-Arc	10% FrF			G			Sur		

TIPOS DE SUELO

Are ARENOSO
 Fr FRANCO
 Tr TRUENO
 Ro ROCA
 Ri RIPIO
 S SAPROLITO
 F FINO

GRUPOS

C CORDILLERANAS
 C+ CORDILLERANAS MAS GRUESO
 G COSTERAS GRUESO
 G+ COSTERAS MAS GRUESO
 F FINO

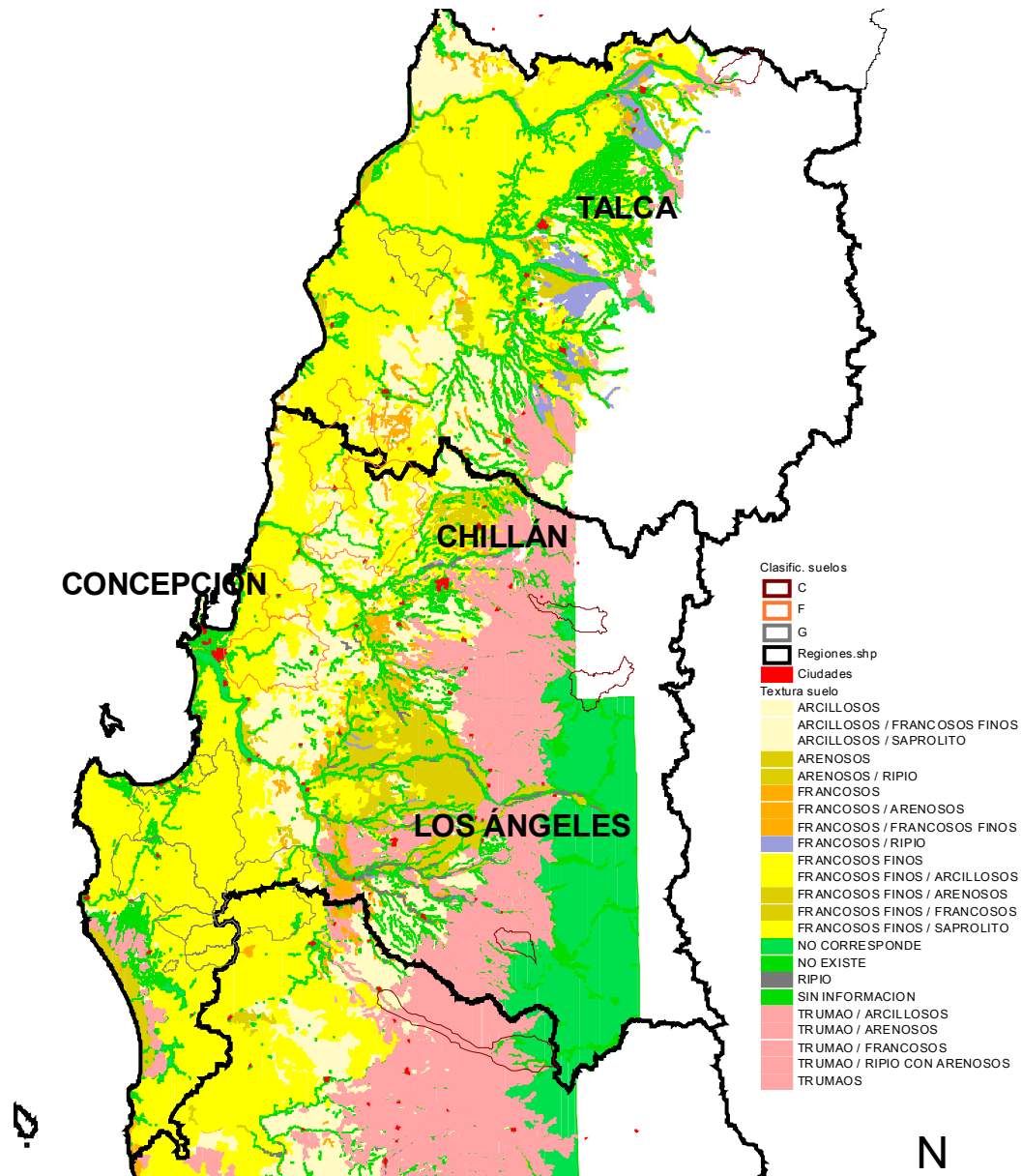
Simulaciones con valores calibrados de los parámetros

- Simul 1** Set de parámetros de suelo (scc, smin, scrit, Por Ef, Hcap, Hsuelo, Khid, K, A y B) calculado como el promedio de los set de las cuencas de los grupos Norte y Sur.
Simul 5 Set de parámetros de suelo (scc, smin, scrit, Por Ef, Hcap, Hsuelo, Khid y K) calculado como el promedio de los set de las cuencas de los grupos Norte y Sur con valores iniciales para A y B.
Simul 6 Variante Extrapol 5 : Pingueral y Andalien se cambiaron del grupo Sur al grupo Norte.

Simulaciones con valores iniciales de los parámetros

- Simul 2** Set de parámetros de suelo (scc, smin, scrit, Por Ef, Hcap, Hsuelo y Khid) deducidos del análisis de tipo de suelo de las cuencas con valores iniciales para A, B y K. (A queda fijo)
Simul 3 Variante Extrapol 2 : Pingueral et Laraquete se cambiaron respectivamente del grupo F al G y del G al F.
Simul 4 Variante Extrapol 3 : Se reestimaron los set de parámetros de suelo considerando un suelo mas grueso para los grupos C (C+) y G (G+).
Simul 7 Set de parámetros de suelo (scc, smin, scrit, Por Ef, Hcap, Hsuelo y Khid) deducidos del análisis de tipo de suelo de las cuencas con valores iniciales para A, B y K. (A se puede mover razonablemente)

Figura N° 42
Grupos de cuencas C, F y G para regionalización de parámetros iniciales



12.4 RESULTADOS DE PARÁMETROS INICIALES REGIONALES

Según se puede observar de todo el análisis realizado con los parámetros iniciales, fue posible generar sets de parámetros iniciales viables para las cuencas a partir de sus características de textura del suelo, clasificándolas en tres grupos: cordilleranas, finas y gruesas. Los parámetros generados para las cuencas de un mismo tipo, si bien tampoco permiten reproducir bien o razonablemente todas las estaciones del grupo, al menos pueden ser fácilmente calibrados, sin alejarse mucho de los parámetros iniciales, con lo cual se evita que estos parámetros pierdan su sentido físico. Por lo tanto, los parámetros propuestos deben entenderse también como parámetros iniciales, para fines de cualquier aplicación. Los caudales sintetizados en base a estos parámetros, deben ser calibrados en la primera estación de aguas abajo que incluya la cuenca sintetizada.

Es necesario hacer énfasis en que esta forma simplificada de obtención de parámetros iniciales, en base a la clasificación de suelos, en conjunto con el cálculo de los parámetros A y B por cuenca, y la obtención de K a partir de la estadística diaria de una cuenca cercana, entrega un set de parámetros necesariamente iniciales, pero que puede ser calibrado, aparentemente sin abandonar los rangos físicos de las variables involucradas.

La metodología simplificada de obtención de parámetros iniciales con sentido físico, que se ha desprendido del análisis, es la siguiente:

- A y B se calculan para cada cuenca en cuestión
- K se obtiene de la estadística en alguna estación cercana de una cuenca similar. Del estudio se han obtenido los valores de 680 para las cuencas cordilleranas, 440 para el grupo Norte y 1360 para el grupo Sur, valores que pueden ser recomendados como valores iniciales.
- Los parámetros de suelo Smin, Scrit, Scc, Porosidad efectiva, Hcapilar y Khid se estiman en base al tipo de suelo, que puede identificarse a partir de las coberturas de CIREN. Para el suelo identificado, se aplica la metodología de Pablo Isensee para obtener los valores de Smin, Scrit y Scc, y las Tablas del Ven Te Chow para la obtención de Porosidad efectiva, Hcapilar y Khid. El valor de Hsuelo se estima en forma arbitraria, con un valor inicial de entre 100 y 500 mm.
- Sets razonables de parámetros iniciales son los que se presentan en el Cuadro N° 43 adjunto. Una proposición de regionalización de estos parámetros iniciales, en base a las características de suelos, se presenta en la Figura N° 43, adjunta.
- Los parámetros de calibración son: A, K, K hid, Hsuelo, Hcap. El parámetro A no debe alejarse mucho del valor que se ha calculado para la cuenca (máximo 20 a 30%, hacia arriba o hacia abajo). Los demás valores se recomienda que permanezcan dentro de límites físicos de estas variables. Los valores de Smin, Scrit y Scc no se calibran.

Cuadro N° 43

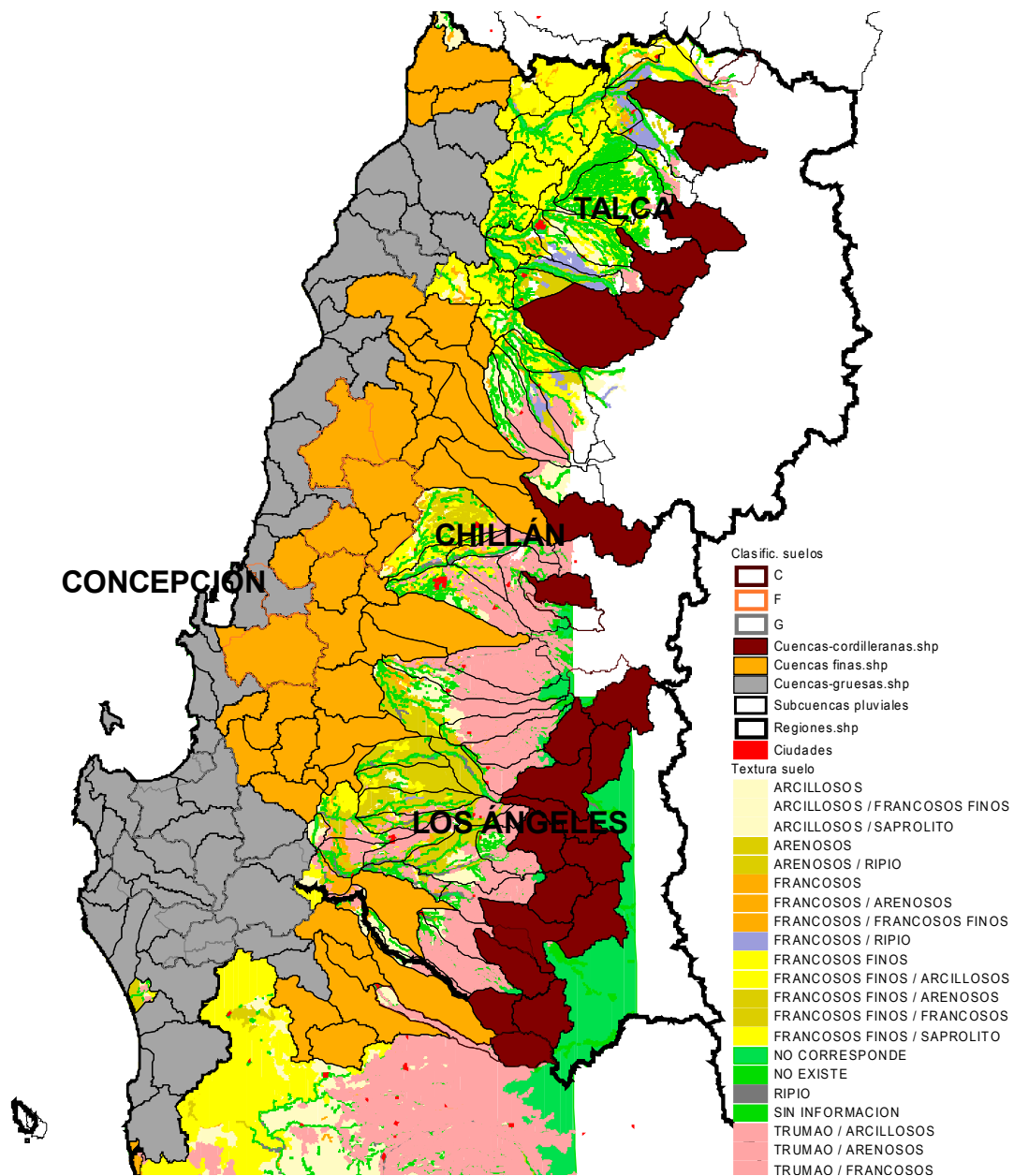
Proposición de parámetros iniciales regionalizados para la zona de estudio

	Set C	Set G	Set F
PorEf[°/1]	0.4	0.36	0.31
Hcap[mm]	100	170	250
Khid[mm/hr]	7.5	2.5	1.2
Scce[°/1]	0.25	0.6	0.8
Scrit[°/1]	0.13	0.39	0.69
Smin[°/1]	0.05	0.25	0.35
Hsuelo[mm]	200	500	500
K[hr]	676	1210	1011

En el Cuadro N° 44 adjunto, se presenta el set de parámetros iniciales de suelos, determinados mediante la metodología simplificada, además de los parámetros calculados de A y B, para cada una de las subcuencas pluviales de las regiones VII, VIII y IX, cubiertas por este análisis. Los valores de este cuadro constituyen la base de datos de la cobertura SIG llamada subcuencas caracterizadas.shp, que se entrega en el Anexo SIG.

En el Anexo 12.4, Carpetas para simulación con nuevos parámetros iniciales, se entregan las carpetas con los archivos de simulación para todas las cuencas de calibración, en que se han puesto como parámetros iniciales los obtenidos mediante la metodología simplificada, propuesta en el presente estudio.

Figura N° 43
Regionalización de parámetros iniciales



Cuadro N° 44

Parámetros iniciales determinados para las subcuencas de las regiones VII, VIII y IX, caracterizables a partir de los suelos

Código SSCuenca	NOMBRE	Area km2	Khid mm/h	K horas	Hcap mm	Hsuelo mm	Scs	Scrit	Smin	PorEf	Tipo Suelo	Estac. Pluv. Asoc	PP anual mm	Estac. Evap. Asoc	EV anual mm	PP cuenca	Evap cuenca	A	B
07000	Lago Vichuquen	613.73	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	495	0.904	0.425
07116	Estero Upeo	367.14	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	La Rufina	1187	Potrero Grande	895	1600	600	1.348	0.670
07118	Estero Guaiquillo	499.77	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	La Rufina	1187	Potrero Grande	895	1150	600	0.969	0.670
07123	Rio Mataquito Entre Este	241.71	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	750	0.904	0.643
07124	Estero Curepto	423.15	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	525	0.904	0.450
07125	Rio Mataquito Entre Este	117.82	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	510	0.904	0.437
07200	Rio Huenchullami	750.88	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	535	0.904	0.459
07210	Costeras entre Rio Huend	336.87	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	700	525	0.904	0.450
07321	Rio Maule entre Rio Mela	306.34	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Potrero Grande	895	2500	600	1.129	0.670
07330	Rio Perquilauquen hasta j	643.41	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	3000	590	1.355	0.794
07332	Rio Perquilauquen entre	348.91	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	910	850	1.176	0.729
07333	Rio Niquen	581.17	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	960	750	1.240	0.643
07334	Rio Perquilauquen Entre	212.27	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	770	597	0.995	0.512
07335	Rio Perquilauquen Entre	377.82	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	830	850	1.072	0.729
07336	Rio Cauquenes hasta junt	#####	0.62	285	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	710	589	0.917	0.505
07337	Rio Tutuven	286.85	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	790	573	1.021	0.491
07338	Rio Cauquenes Entre Rio	194.36	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	720	583	0.930	0.500
07339	Rio Cauquenes Entre Arri	168.63	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	750	578	0.969	0.496
07340	Rio Perquilauquen entre	297.11	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	850	1.034	0.729
07341	Rio Purapel Hasta Bajo Ju	262.74	2.50	540	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	548	1.034	0.470
07343	Rio Purapel Entre Estero	309.28	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	571	1.034	0.490
07344	Rio Perquilauquen Entre	121.96	0.62	440	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	850	1.034	0.729
07358	Rio Putagan	953.20	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Potrero Grande	895	960	600	0.434	0.670
07370	Rio Claro Hasta Estero Sir	389.52	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Potrero Grande	895	1700	600	0.768	0.670
07374	Rio Lircay Hasta Estero Pi	402.53	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Potrero Grande	895	1550	600	0.700	0.670
07382	Rio Maule Entre Estero C	279.71	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	760	553	0.982	0.474
07383	Rio Maule Entre Quebrad	178.53	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	780	542	1.008	0.465
07384	Rio Maule Entre Estero La	239.36	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	760	533	0.982	0.457
07400	Costeras entre Quebrada	511.26	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	780	542	1.008	0.465
07410	Costeras entre Rio Reloca	501.86	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	558	1.034	0.479
07411	Rio Reloca Entre Arriba E	131.63	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	553	1.034	0.474
07420	Costeras entre Rio Reloca	89.72	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	557	1.034	0.478
07430	Rio Curanilahue	196.83	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	564	1.034	0.484
07440	Costeras Entre Rio Curan	564.12	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuven Embals	1166	800	575	1.034	0.493

Código SSCuencia	NOMBRE	Area km2	Khid mm/h	K horas	Hcap mm	Hsuelo mm	Scs	Scrit	Smin	PorEf	Tipo Suelo	Estac. Pluv. Asoc	PP anual mm	Estac. Evap. Asoc	EV anual mm	PP cuenca	Evap cuenca	A	B
08000	Costeras Entre Limite Reg	444.04	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuvén Embals	1166	840	595	1.085	0.510
08010	Costeras entre Rio Taucu	172.43	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	San Javier	774	Tutuvén Embals	1166	1000	597	1.292	0.512
08111	Rio Cato en junta Rio Nib	228.81	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	1920	592	0.867	0.797
08112	Rio Nublinta	191.97	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.000	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	2000	535	0.903	0.720
08119	Rio Nuble Entre Rio Chilla	132.90	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1460	600	1.328	0.515
08120	Rio Cholguan Bajo Junta	260.47	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	900	600	0.407	0.808
08133	Rio Itata entre Rio Diguill	295.49	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	2250	450	2.047	0.386
08134	Rio Larqui	699.60	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1080	750	0.983	0.643
08135	Rio Itata entre Estero Coy	393.62	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1200	600	1.092	0.515
08140	Rio Itata Entre Rio Nuble	344.66	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1020	600	0.928	0.515
08141	Rio Itata Entre Estero Chu	253.25	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	980	597	0.892	0.512
08142	Rio Lonquen Hasta Estero	539.11	0.62	500	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	San Javier	774	Tutuvén Embals	1166	960	603	1.240	0.517
08143	Rio Lonquen Entre Arriba	197.74	0.62	500	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	780	598	0.710	0.513
08144	Rio Lonquen Entre Estero	360.08	0.62	500	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	880	600	0.801	0.515
08145	Rio Itata entre Rio Longu	236.93	2.50	440	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	0	860	596	0.783	
08200	Costeras Entre Rio Itata y	378.45	2.50	2000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1000	597	0.763	0.512
08210	Costeras entre Rio Pingue	239.10	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1200	610	0.915	0.523
08220	Rio Andalien	794.13	0.62	1260	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1500	628	1.144	0.539
08230	Costeras entre Rio Andali	87.02	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1460	624	1.114	0.535
08315	Rio Queuco entre Rio Nir	418.54	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	2700	500	1.255	0.673
08316	Rio Huequecura	341.91	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	5000	505	2.323	0.680
08317	Rio Bio-Bio entre Rio Que	434.89	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	3000	600	1.394	0.808
08320	Rio Duqueco Hasta Bajo B	326.02	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	3750	455	1.743	0.612
08321	Rio Duqueco Entre Estero	288.78	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	2950	504	1.371	0.678
08331	Rio Bureo Hasta Bajo Est	318.73	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	5000	510	2.323	0.686
08333	Rio Bureo entre Rio Mulc	483.72	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1200	610	1.092	0.493
08340	Rio Renaico hasta bajo ju	338.75	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	2920	500	1.357	0.673
08341	Rio Renaico Entre Rio Am	224.91	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	2600	562	1.208	0.756
08343	Rio Mininco	568.36	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Cerro El Padre	2152	Angol	1237	1690	600	0.785	0.485
08350	Rio Malleco hasta bajo ju	237.72	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	3000	510	1.394	0.686
08351	Rio Malleco Entre Rio Nib	179.29	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	1700	600	0.790	0.808
08352	Rio Malleco Entre Bajo Es	198.75	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1150	600	1.046	0.485
08353	Rio Huequen	523.57	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1270	600	1.156	0.485
08354	Rio Rehue Hasta Bajo Est	325.56	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1250	600	1.137	0.485
08355	Rio Rehue Entre Estero Ll	367.20	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	840	540	0.764	0.437
08356	Rio Rehue Entre Arriba Es	254.12	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Angol	1237	990	595	0.901	0.481
08357	Rio Ricoiquen	218.24	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Angol	1237	1150	632	1.046	0.511
08358	Rio Malleco entre Rio Rah	301.34	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1100	620	1.001	0.501
08360	Rio Coihue y Rio Esperanz	617.35	2.50	1350	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Angol	1237	1200	653	1.092	0.528
08361	Rio Culenco	469.90	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Angol	1237	1200	679	1.092	0.549
08362	Rio Toboleo Entre Junta F	216.38	2.50	1350	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Chillancito	1099	Angol	1237	1200	665	1.092	0.538

Código SSCuenca	NOMBRE	Area km2	Khid mm/h	K horas	Hcap mm	Hsuelo mm	Scc	Scrit	Smin	PorEf	Tipo Suelo	Estac. Pluv. Asoc	PP anual mm	Estac. Evap. Asoc	EV anual mm	PP cuenca	Evap cuenca	A	B
08367	Rio Bio-Bio entre Rio Gua	281.95	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1090	660	0.992	0.534
08373	Rio Polcura Entre Rio Val	389.90	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	2150	400	0.971	0.538
08374	Rio Polcura Entre Estero	287.46	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	2000	415	0.903	0.559
08375	Rio Laja Entre Estero Polc	409.75	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	1600	520	0.743	0.700
08376	Rio Rucue	240.80	7.50	680	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	5000	508	2.323	0.684
08383	Rio Laja entre Rio Calibor	142.84	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1180	633	1.074	0.512
08384	Rio Claro Hasta Estero Co	453.70	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1000	605	0.910	0.519
08385	Rio Claro Entre Arriba Est	452.09	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1020	620	0.928	0.501
08386	Rio Laja entre Rio Claro y	51.81	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1000	646	0.910	0.522
08390	Rio Bio-Bio Entre Rio Laja	299.66	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Angol	1237	1050	640	0.955	0.517
08391	Rio Bio-Bio Entre Rio Gor	237.79	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1120	656	0.854	0.530
08392	Estero Quilacoya	371.37	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Chillancito	1099	Tutuvén Embals	1166	1280	632	1.165	0.542
08393	Rio Bio-Bio Entre Estero C	145.10	0.62	1360	250	500	0.800	0.690	0.350	0.310	Fino	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1400	650	1.068	0.557
08394	Rio Bio-Bio Entre Estero H	311.73	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Tutuvén Embals	1166	1450	653	1.106	0.560
08410	Costeras entre Rio Bio-Bio	148.24	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1380	664	1.053	0.537
08420	Costeras Entre Rio Manco	105.61	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1290	670	0.984	0.542
08430	Costeras Entre Rio Laraqu	109.96	2.50	1000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1280	680	0.976	0.550
08500	Rio Carampangue Hasta a	311.65	2.50	1000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2500	698	1.907	0.564
08510	Rio Carampangue Entre B	281.72	2.50	1000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2700	698	2.059	0.564
08520	Rio Lia	343.46	2.50	1000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1400	676	1.068	0.546
08530	Rio Carampangue Entre A	325.34	2.50	1000	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1650	690	1.259	0.558
08600	Costeras entre Rio Caram	275.54	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1200	690	0.915	0.558
08610	Costeras entre Punta Lav	157.34	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1130	690	0.862	0.558
08620	Rio Quiapo	125.90	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1400	690	1.068	0.558
08630	Costeras entre Rio Quiap	65.37	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1520	650	1.159	0.525
08700	Rio Descabezado hasta ju	220.02	2.50	900	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2200	698	1.678	0.564
08701	Rio Curanilahue entre Rio	336.65	2.50	900	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1910	697	1.457	0.563
08710	Rio Pilpilco	138.62	2.50	900	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2500	680	1.907	0.550
08720	Rio Lebu Entre Junta Rios	162.68	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1630	650	1.243	0.525
08800	Costeras entre Rio Lebu y	211.58	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1500	630	1.144	0.509
08810	Costeras Entre Rio Pangu	269.20	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1500	645	1.144	0.521
08820	Rio Tucapel (Caramavida)	268.15	2.50	1600	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2300	680	1.754	0.550
08821	Rio Leiva (Caicupil , Butar	421.08	2.50	1300	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	2000	695	1.526	0.562
08822	Rio Peleco Entre Junta Rio	438.08	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1800	673	1.373	0.544
08823	Rio Paicavi entre Lago La	87.76	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1500	630	1.144	0.509
08900	Costeras entre Rio Paicav	161.86	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1500	642	1.144	0.519
08910	Rio Lleulleu	617.17	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1780	600	1.358	0.485
08920	Costeras entre Rio Lleulle	133.88	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1610	600	1.228	0.485
08930	Rio Tirua	426.51	2.50	1360	170	500	0.600	0.390	0.250	0.360	Grueso	Canete	1311	Angol	1237	1650	600	1.259	0.485
	Rio Niblinto antes canal a	161.62	7.50	920	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	2000	570	0.903	0.767
	Estero El Manzano Antes	133.30	7.50	410	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	La Rufina	1187	Potrero Grande	895	1100	600	0.927	0.670
	Rio Malleco en Collipulli	410.02	7.50	650	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Cerro El Padre	2152	Diguillin	743	3000	550	1.394	0.740
	Rio Diguillin en San Loren	199.22	7.50	970	100	200	0.250	0.130	0.050	0.400	Cordilleran	Bullileo Embals	2214	Diguillin	743	2500	400	1.129	0.538

CAPÍTULO 13

SIG Y MAPA

Todas las coberturas que se han venido presentando a lo largo del estudio, se entregan organizadas en un proyecto SIG, en formato digital, y en un mapa en papel en cual se ha impreso algunas coberturas seleccionadas.

La presentación se ha organizado de modo de incluir toda la información en un solo mapa, dividido en dos partes, VIIª región y VIIIª región, para representar mejor el área de estudio.

En el mapa se presentan los sets de parámetros iniciales regionalizados. El mapa despliega los parámetros iniciales de calibración, determinados a nivel de subsubcuencas. En el cuadro grande de abajo, se encuentran los parámetros individuales (A, B, K y Área) de cada subsubcuenca. Las subsubcuencas se agruparon en tres grupos, por tipo de suelo: suelos cordilleranos, gruesos y finos, que se despliegan en color café, gris y naranja, respectivamente. Los parámetros comunes por grupo (PorEf, Hcap, Khid, Scc, Scrit, Smin y Hsuelo), se presentan en los cuadros pequeños. El contenido del mapa está incluido en un proyecto SIG llamado Simed7y8mapa.apr, que se encuentra en la carpeta SIG del Anexo Digital.

También se encuentran en la carpeta SIG todas las coberturas de este estudio, esto es, las coberturas de base entregadas por la DGA y todas las coberturas propias del proyecto, que se enumeran a continuación, en el Cuadro N° 45.

Cuadro N° 45
Coberturas .shp del estudio

Nombre carpeta	Nombre archivo	Nombre leyenda en mapa papel	Observaciones
1. Coberturas generadas en el estudio			
cauces	cauces.shp		Cauces principales en las cuencas seleccionadas (para cálculo de parámetros geomorfológicos)
Centroides	centroides.shp		Centroides de las cuencas seleccionadas para calibración(para cálculo de parámetros geomorfológicos)
Cuencas	cuencas.shp	Cuenca seleccionada para calibración	Cuencas seleccionadas para calibración
evap1	evap1.shp	Estación evaporimétrica usada para calibración	Selección de estaciones evaporimétricas (8 estaciones)
fluvio1	fluvio1.shp		Resultado de la primera selección de estaciones fluviométricas (70 estaciones)
fluvio2	fluvio2.shp		Resultado de la segunda selección de estaciones fluviométricas (21 estaciones)
fluvio3	fluvio3.shp	Estación fluviométrica apta para calibración	Resultado de la tercera selección de estaciones fluviométricas (18 estaciones)
Grupos	grupos.shp		Agrupación de estaciones pluviométricas para el cálculo del parámetro A (6 grupos)
lim_cuenc_pluv	lim_cuenc_pluv.shp	Límite Cuencas Pluviales / Nivales y Mixtas	Límite entre cuencas pluviales y nivales y mixtas
		Area Pluvial No Caracterizada	Area pluvial no caracterizada (alterada)
		Area Nival y Mixta	Area nival y mixta
pluvio1	pluvio1.shp		Resultado de la primera selección de estaciones pluviométricas (55 estaciones)
pluvio2	pluvio2.shp	Estación pluviométrica usada para calibración	Resultado de la segunda selección de estaciones pluviométricas (15 estaciones)
pluvio3	pluvio3.shp		Resultado de la selección de estaciones pluviométricas/gráficas usadas para caracterizar el régimen de las cuencas (34 estaciones)
polígonoos	pgon4.shp		Polígonos de Thiessen para cálculo del parámetro A
Set_parametros_iniciales	subcuencas-caracterizadas-4.shp	Tipo de Suelo Cordillerano	Resultados: sets de parámetros iniciales
		Tipo de Suelo Fino	Resultados: sets de parámetros iniciales
		Tipo de Suelo Grueso	Resultados: sets de parámetros iniciales
2. Coberturas DGA			
Etreal	evapotranspiraciñreal.shp		Curvas de isoevapotranspiración real para cálculo del parámetro B
evaporimetricas	evaporimetricas.shp		Universo de estaciones evaporimétricas de la zona de estudio
meteorologicas	meteorologicas.shp		Universo de estaciones meteorológicas de la zona de estudio
fluviométricas	fluviometricas.shp		Universo estaciones fluviométricas de la zona de estudio
isohietas	isoyetas.shp		Curvas de isoprecipitación para cálculo del parámetro A

CAPÍTULO 14**CONCLUSIONES**

El objetivo central del presente estudio fue intentar una regionalización de los parámetros de calibración del modelo SIMED, basado en la suposición de que los parámetros conservan el sentido físico que el modelador les atribuyó al describir los procesos del suelo a través de diversas ecuaciones, y que por lo tanto, son asociables a alguna característica ya sea física, geomorfológica, hidrológica o de tipo de suelo, de la cuenca estudiada.

El objetivo del estudio, de entregar parámetros calibrados regionalizados, no se logró, presumiblemente por dos razones.

- los parámetros de modelación no tienen un sentido físico puro, y si ya es dudoso el sentido físico inicial de un parámetro que representa una especie de promedio de una cierta característica en toda una cuenca, definitivamente lo es una vez que se ha calibrado el modelo, en que el parámetro ya no representa sólo esa característica, sino que se “contamina” con todos los parámetros que no están explicitados en el modelo pero que afectan el comportamiento del agua en el suelo.
- los parámetros son muchos, y reaccionan en forma diversa frente a la diversidad de las características de las cuencas. Para cuencas de características similares, el mismo parámetro puede adoptar valores de un tipo en algunas cuencas y de otro en otras cuencas, para obtener una buena calibración.

Por lo señalado, no fue posible encontrar ningún tipo de relación entre los parámetros calibrados del modelo y algunas características físicas del suelo, tales como textura del suelo, granulometría, capacidad de uso, profundidad, ni tampoco con parámetros de caracterización geomorfológica como la pendiente de Mociornita, el índice de compacidad o el coeficiente orográfico.

Las características hidrológicas de los caudales registrados en las estaciones, como curvas de duración, de frecuencia, tipo de hidrograma y rango de precipitación, permitieron asociar los parámetros de calibración a dos grandes grupos, Norte y Sur. Sin embargo, al generar parámetros regionales en base a los promedios de las estaciones comprendidas en cada grupo, ellos no representan bien la características de los caudales observados, por lo que no pueden considerarse parámetros calibrados, aunque sí iniciales de cualquier simulación.

Por otro lado, se buscó una manera simplificada de generar parámetros iniciales, que tuvieran un claro sentido físico, según se describe en el capítulo 12.4. Estos parámetros iniciales tampoco pueden considerarse calibrados, o entregando valores de caudal definitivos, pero pueden ser calibrados manteniéndolos dentro de rangos físicos razonables.

No obstante lo anterior, se logró trabajar con el modelo, hacer sugerencias simplificadas para obtención de parámetros iniciales y su calibración, y hacer algunas

sugerencias de mejoras, para la información de entrada y para la operación del modelo, como se ha señalado con detalle en cada uno de los capítulos.

En resumen, las principales conclusiones del presente estudio son las siguientes:

1. Entre los antecedentes consultados para el desarrollo del estudio, se incluyeron fundamentalmente estudios realizados en la DGA con el modelo SIMED, estudios de suelos, coberturas de suelos de CIREN obtenidas en base a tales estudios, estudios (escasos) de evaporación horaria de España (no los hay en Chile) y un estudio de regionalización de parámetros. Lo que principalmente se puede decir acerca de esta revisión, es lo siguiente:
 - es muy eficiente contar con la caracterización del suelo en formas de coberturas .shp, que permiten trabajar con ellas en forma espacial aplicando programas del tipo GIS.
 - por otro lado, los estudios con el modelo SIMED, entregaron antecedentes importantes que pudieron ser analizados y revisados en el presente trabajo, como el procedimiento de calibración.
 - en Chile no hay mediciones de evaporación horaria. Los modeladores usan los datos horarios recomendados para el uso del modelo Sacramento. Sólo en España se encontraron algunas experiencias de medición horaria de la evaporación, que se presentan en el capítulo correspondiente.
 - finalmente, se considera un antecedente no menor el hecho de que en el estudio de Astudillo, sobre regionalización de parámetros de modelación, en que se trató de encontrar un comportamiento extrapolable de los parámetros calibrados de los modelos CICA y Brown y Ferrer, se concluyera que dicha regionalización resultó relativamente aceptable sólo cuando los parámetros promedio de grupo se aplicaron al grupo de precipitaciones altas.
2. El estudio comenzó con un análisis de las estaciones fluviométricas, para las cuales se determinó si eran o no pluviales, si estaban o no alteradas por el riego, y si las condiciones observadas en terreno permitían aceptarlas como estaciones con mediciones adecuadas. En este sentido, lo más notable fue encontrar en terreno una estación de dudosa calidad para el registro de crecidas, que fue Estero los Puercos en Puente los Puercos, por tener varios brazos, y una estación inservible, Loanco en Desembocadura, que tiene influencia marina, y aparentemente por ello se construyó una gran barrera que independiza la estación de la entrada del mar. Esta barrera embalsa el flujo del río y altera el registro limnigráfico. Si bien las medidas de caudal actualmente se trasladaron hacia aguas arriba, hacia un punto sin embalsamiento, se continúan asociando los caudales a las alturas limnimétricas registradas en la zona embalsada, según lo cual carecen de valor.
3. Una vez determinadas las estaciones que cumplían con todas las condiciones de aptitud para la calibración, se definieron las subcuencas de calibración correspondientes. Las cuencas resultantes fueron fundamentalmente precordilleranas y costeras. Analizada la gran intensidad del riego en la zona de estudio, y la gran cantidad de canales importantes que no tienen registro de

- caudales, hubo que considerar las estaciones del valle central como alteradas, por lo cual no se incluyeron en el análisis.
4. Buscando luego la asociación con estaciones de precipitación y evaporimétricas para la calibración, se encontró que era una gran limitante del modelo el hecho de ingresar precipitaciones diarias, para luego tener que transformarlas en horarias a partir de una distribución dada. Se sugirió como mejora sustancial del modelo poder ingresar estadísticas horarias, las que se logran en forma bastante satisfactoria usando las estadísticas horarias de alguna estación pluviográfica cercana afín, y transponiendo hacia la estación de interés la distribución horaria tal como es, día a día.
 5. Lo anterior cobra especial sentido en vista de la génesis de los factores de distribución horaria de la precipitación diaria. La forma en que se hizo esta transformación en los estudios anteriores, responde a la forma en que se distribuyen determinadas tormentas individuales en el tiempo, pero no a la forma en que se distribuye la precipitación a lo largo del día. Por esta razón, y por no poder contar con una adaptación del modelo para que acepte como dato de entrada la precipitación horaria, se hizo una proposición de mejoramiento de los factores de distribución horaria, basada en la forma en que mayoritariamente se distribuye la precipitación a lo largo del día en una estación, y no a lo largo de una tormenta. Los detalles de esta nueva metodología se presentan en el capítulo 5. Esta nueva metodología se considera un aporte importante para la aplicación futura del SIMED.
 6. Los factores de distribución horaria de la evaporación son menos polémicos, porque los medidos en España son similares a los que usa el modelo Sacramento. Finalmente se propusieron factores similares a los de Sacramento, pero basados en las experiencias de España.
 7. Los períodos de calibración se tomaron solamente de entre aquéllos que contaban con estadísticas concurrentes de caudal, precipitaciones y evaporación. Este criterio acordado con la Inspección Fiscal, podría relajarse sólo en cuanto a la evaporación, cuyos valores mensuales son relativamente invariables de año a año, y tienen menor efecto en los caudales finalmente simulados, que la precipitación.
 8. Se puso gran énfasis en obtener valores muy precisos del parámetro A, que es el factor de transposición de la precipitación promedio anual puntual de la estación, al área completa de la cuenca. Este parámetro se obtuvo en base a isohietas y a polígonos de Thiessen. En general, los valores para A obtenidos a partir de ambos métodos, resultaron similares, según lo cual bastaría usar solamente uno de los dos.
 9. Sin embargo, el parámetro A fue uno de los que más cambió durante la calibración realizada en base a la metodología existente. Esto se atribuyó a dos aspectos:
 - El comportamiento de los valores promedio en la estación no refleja necesariamente lo que ocurre en las tormentas aisladas.

- La magnitud de la modificación del parámetro A, como también todos los demás, durante la calibración, está relacionada con la calidad de la estimación inicial de los parámetros de suelo. Si éstos son más realistas, la calibración no requiere fuertes modificaciones de los parámetros, manteniéndose ellos dentro de rangos físicos razonables.

La nueva metodología de obtención de parámetros iniciales, que se presenta en el capítulo 12.4, y se aplica a las cuencas pluviales de las regiones bajo análisis, muestra que no es conveniente ni necesario modificar demasiado el parámetro A calculado, para lograr una buena calibración, si todos los demás parámetros iniciales están adecuadamente escogidos.

10. El parámetro B integra dos conceptos diferentes, que son: transposición de la evaporación puntual de la estación al área de la cuenca, por un lado, y transformación de la evaporación de tanque en evapotranspiración de la vegetación, por otro. Se propone hacer una separación de ambos conceptos, y expresar cada uno de ellos con un parámetro diferente. Esta separación permitiría hacer más operativo el sentido físico del parámetro, aislando el efecto de ambos conceptos, con lo cual, de ser necesario, se calibraría sólo el segundo.
11. En cuanto al parámetro B, éste se determinó en base a líneas de isoevaporación de tanque y una estimación de la razón evaporación de tanque / evaporación de la vegetación. Así determinado, en una cuenca forestal, se esperaba que este parámetro variara en la calibración, más fuertemente que el parámetro A. En efecto, en la calibración original, los valores calibrados resultaron significativamente menores que los estimados inicialmente. Sin embargo, en la segunda calibración del modelo, efectuada a partir de parámetros iniciales más realistas, no fue necesario calibrar el valor inicial calculado para B.
12. También para los parámetros K de embalse y Khid de la conductividad del suelo, se puso gran énfasis en su determinación inicial, usando las metodologías propuestas en los estudios anteriores para estimarlos. Al respecto, se puede decir lo siguiente:
 - El parámetro Khid se puede estimar en forma mucho más simplificada, a partir de una estimación del tipo de suelo, y usando la tabla del Ven Te Chow. A partir de este valor, este parámetro se calibra sin necesidad de alejarse mucho del valor inicial, manteniendo razonablemente su sentido físico.
 - El parámetro K, por el contrario, es necesario obtenerlo de las estadísticas de caudales diarios. Si se requiere estimar en una cuenca en la que no hay estadísticas, debiera usarse un valor obtenido de las estadísticas de una estación cercana con cuenca similar a la estudiada.
13. De acuerdo con la metodología usada antes del presente estudio, la determinación de los parámetros propios del suelo Smin, Scrit y Scc en general está basada en relaciones que se producen en suelos de laboratorio, que son más o menos representativas del terreno que uno está analizando con el modelo. Según la experiencia recabada en el presente estudio, parece más conveniente

estimar estos parámetros de suelo directamente a partir de las características de suelo de las cuencas, obtenidas de mapas de texturas, como los de CIREN, y de las recomendaciones de Rubén León. Una vez asumidos estos parámetros, es conveniente no moverlos durante la calibración, primero porque ellos no afectan mucho los valores de caudal resultantes, y segundo, porque se asume que debe mantenerse cierta relación entre ellos.

14. Para los parámetros calibrados en la calibración original, no fue posible encontrar una asociación con variables físicas que permitieran regionalizarlos. Se intentó asociar los parámetros según los siguientes conceptos:

- asociarlos entre ellos
- asociarlos con características de textura, profundidad, granulometría y capacidad de uso del suelo
- asociarlos con parámetros geomorfológicos de las cuencas: pendiente S de Mociornita, coeficiente orográfico, coeficiente de compacidad.

De este análisis no se obtuvo ninguna asociación clara que permitiera la regionalización de los parámetros calibrados.

15. Este resultado se vio corroborado en la memoria de título “Calibración de modelos de escorrentía en cuencas pluviales”, realizada en 1992 por Bernarda Astudillo y dirigida por Ludwig Stöwhas, en la Universidad Técnica Federico Santa María, en la cual se buscó la forma de regionalizar los parámetros de calibración de dos modelos, CICA y Brown y Ferrer. Se intentó asociar los parámetros calibrados con dos variables regionales, la latitud y la precipitación. Como resultado, en el primer caso (latitud) se obtuvo que, para ninguno de los dos modelos, los parámetros promedio de los grupos identificados permiten reproducir bien las características de las estadísticas observadas del propio grupo. Esto era de esperarse, porque incluso dentro de cada grupo, los parámetros varían mucho. En el segundo caso (precipitación), los parámetros promedio aplicados a cuencas escogidas de los diversos grupos entregan valores adecuados, para los grupos de precipitaciones más altas. Para el grupo de precipitaciones bajas, los resultados son deficientes para ambos modelos.

16. En vista de todo lo anterior, se buscó asociar los parámetros de calibración con algunas características hidrológicas de las cuencas, como curva de frecuencia, curva de duración, apreciación visual de las características de los hidrogramas observados, y rangos de precipitación, para encontrar un criterio de regionalización. Al respecto se puede decir que se pudo identificar dos grupos de cuencas, que se llamaron norte y sur, con parámetros relativamente similares entre ellas, y diferentes del otro grupo. Estos parámetros dieron lugar a un set promedio en cada caso. Sin embargo, la aplicación del set promedio a cada una de las estaciones del grupo no permitió obtener simulaciones consistentemente buenas. De este modo, nuevamente se llega a la conclusión de que los parámetros así regionalizados, sólo pueden servir como parámetros iniciales de calibración, y no como parámetros finales.

17. Como conclusión general del análisis realizado para los parámetros calibrados, se puede decir que no hay evidencia de que ellos se correlacionen con alguna

variable, ya sea física, hidrológica, geográfica o de suelo. Por esta razón, no se ha podido proceder a una regionalización de los parámetros calibrados del SIMED. En caso de transponer parámetros calibrados hacia otras cuencas, ellos necesariamente deben considerarse como parámetros iniciales, y ser calibrados antes de su aplicación.

18. En vista de la dificultad de regionalizar los parámetros calibrados, se buscó hacer lo mismo con los parámetros iniciales. Fue necesario utilizar para ello parámetros iniciales de génesis diferente a la desarrollada en el estudio, más simplificada, y basada fundamentalmente en las características de suelo, de modo de poder generarlos en cuencas sin control fluviométrico.
19. La metodología simplificada para estimar los valores iniciales de los parámetros, que se desprende del trabajo realizado en el presente estudio, es la siguiente:
 - Calcular los parámetros A y B para la cuenca en cuestión
 - Obtener K de la estadística en alguna estación cercana de una cuenca similar. Del estudio se han obtenido los valores de 680 para las cuencas cordilleranas, 440 para el grupo Norte y 1360 para el grupo Sur, valores que pueden ser recomendados como valores iniciales.
 - Los parámetros de suelo Smin, Scrit, Scc, Porosidad efectiva, Hcapilar y Khid se estiman en base al tipo de suelo, que puede identificarse a partir de las coberturas de CIREN. Para el suelo identificado, se aplica la metodología de Pablo Isensee y Rubén León para obtener los valores de Smin, Scrit y Scc, y las Tablas del Ven Te Chow para la obtención de Porosidad efectiva, Hcapilar y Khid. El valor de Hsuelo se estima en forma arbitraria, con un valor inicial de entre 100 y 500 mm.
 - Los parámetros de calibración son: A, K, K hid, Hsuelo, Hcap. El parámetro A no debe alejarse mucho del valor que se ha calculado para la cuenca (máximo 20 a 30%, hacia arriba o hacia abajo). Los demás valores se recomienda que permanezcan dentro de límites físicos de estas variables. Los valores de Smin, Scrit, Scc y B no se calibran.
20. En base a esta metodología, se concretó el objetivo de generar parámetros iniciales para todas las cuencas pluviales identificadas en las regiones VII, VIII y parte de la IX, y cubiertas por suelos similares a los que se encontraron para las cuencas de calibración. Se calcularon los valores de A y B para todas estas cuencas en base a las estaciones pluviométricas y evaporimétricas seleccionadas, y las curvas de isoyetas e isoevaporación. Se estimó para cada cuenca un valor de K, en base a los valores generados en cuencas cercanas. Por último, se estimaron los parámetros de suelo a partir de las coberturas de suelo de CIREN, basándose en las características de textura.
21. Como resultado, se entrega un mapa en papel y las coberturas SIG en que se despliega, para cada una de las cuencas pluviales analizadas, un set de parámetros iniciales para el posterior trabajo con el modelo SIMED (valores del Cuadro N° 44). Los parámetros iniciales de suelo, determinados por la metodología simplificada a partir de las coberturas de textura de CIREN, en

combinación con los parámetros A, B y K calculados, entregan un buen set de parámetros iniciales, pero necesariamente deben pasar por un proceso de calibración en una estación de cierre lo más cercana posible, antes de asumir los caudales generados como aceptables.

22. Se observa que, para usar adecuadamente el modelo SIMED, tiene importancia hacer una estimación razonable, aunque gruesa, de los parámetros iniciales de calibración. Una estimación de este tipo permitirá calibrar el modelo, sin alejarse demasiado de los valores originales de los parámetros, con lo cual no perderán su sentido físico.
23. De todas maneras, y sea cual sea la estimación inicial de los parámetros, para la aplicación del modelo en cuencas no controladas es totalmente necesario que el modelo sea calibrado en algún punto de cierre, que puede ser alguna estación fluviométrica intermedia o de cierre de la cuenca completa. El modelo SIMED no puede considerarse apto para la generación de caudales en subcuencas, por la mera determinación de sus parámetros iniciales, sino hasta que esté debidamente calibrado en alguna estación de cierre.
24. Por último, se hacen algunas recomendaciones para facilitar la interacción del operador con el modelo SIMED, las cuales se refieren fundamentalmente a la visualización a través de las ventanas, a la emisión de mensajes de error y al manejo externo de rangos de las variables para el análisis de sensibilidad fino.

ANEXO DIGITAL Y MAPAS

