



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**CALIBRACIÓN Y USO DEL MODELO VIC  
PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO  
EN LA CUENCA DE ACONCAGUA EN CHACABUQUITO**

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

**JUAN PABLO ULLOA DUARTE**

**PROFESORA GUIA:  
XIMENA VARGAS MESA**

**INTEGRANTES COMISIÓN EVALUADORA:  
JAMES McPHEE TORRES  
ERNESTO BROWN FERNANDEZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
MAYO 2012**

## Resumen

La estimación del recurso hídrico es de gran importancia para el desarrollo de la actividad agrícola en la zona central del país, específicamente en su forma nival el ser esta la predominante en los meses de primavera y verano. Es por esto que se hace necesario un pronóstico de caudales para la época de deshielos, septiembre a marzo, que permita una correcta planificación sobre la hidrología de las zonas de riego del país. En Chile, los pronósticos se han realizado mediante correlaciones simples y múltiples, utilizándose además técnicas del análisis de componentes principales, se busca entonces generar un nuevo pronóstico de baja incertidumbre.

La presente memoria muestra el trabajo con el modelo hidrológico a macro escala VIC, enfocada al pronóstico de caudales de deshielo, para dar solución al problema de la determinación de la disponibilidad del recurso hídrico en cuencas grandes. La zona de estudio corresponde a la hoya del Río Aconcagua en Chacabucuito, ubicada en la quinta región de Valparaíso ( $33^{\circ} 51' S$  y  $70^{\circ} 31' W$ ). Dicha cuenca tiene un área de  $2.084 \text{ km}^2$  y una altitud media de  $3174 \text{ m.s.n.m.}$  es decir, se trata de una cuenca de grandes proporciones en altura. Cuenta con una estación fluviométrica que reporta en tiempo real, ubicada  $8 \text{ km}$  aguas arriba de la ciudad de Los Andes.

La metodología de trabajo para el uso del modelo necesita de una distribución espacial y temporal para parámetros de vegetación y suelo, así como también para variables meteorológicas forzantes, tales como precipitación, temperatura y velocidad del viento. Este trabajo se ve entorpecido en función de la baja densidad de estaciones con información meteorológica disponible, lo que hace necesario el uso de metodologías para la distribución, proceso que se transforma en una limitante para el pronóstico realizado, incidiendo directamente en la calidad de las simulaciones de VIC.

La calibración del modelo indica que este es capaz de realizar una correcta simulación de caudales medios mensuales, sin embargo no lo es para un trabajo a escala diaria de escorrentía. Por condiciones externas al modelo, que tienen que ver con la información meteorológica disponible, este solo pudo simular caudales en dos años considerados hidrológicamente secos, por lo que no existe total certeza de si los problemas encontrados en el pronóstico se tendrán constantemente o si serán obviados durante años húmedos. Esto dice relación con una sobrevaloración del mes de diciembre, mes de mayor caudal, para el mejoramiento de los valores entre diciembre y marzo se presenta una actualización del pronóstico, el cual entrega valores de mayor exactitud en este periodo.

Finalmente, se propone una serie de recomendaciones para el trabajo futuro, orientadas principalmente a la mejora de la información hidrometeorológica disponible, tanto a nivel de cantidad de estaciones como a la cantidad de variables medidas, ya que este es el principal factor para entregar una alta precisión a cualquier tipo de modelo hidrológico, y de esta forma poder generar una correcta estimación del caudal futuro. La implementación de modelos de mayor complejidad está supeditada a la cantidad de información, y mientras esta sea pobre no se encontraran mejoras significativas.

## **Agradecimientos**

El camino a la finalización de mi carrera fue largo y a ratos complejos, es por eso que me gustaría agradecerle a la gente que me brindó su apoyo. En primer lugar quiero mencionar a la gente del Departamento de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, tanto profesores como alumnos, quienes siempre estuvieron disponibles para cualquier duda y ayudar con la mejor disposición, formándose un grupo de trabajo muy unido. En particular me gustaría mencionar a la Profesora Ximena Vargas, con quien por cosas del destino tuve la suerte de tener el curso de Hidrología, en un momento en que tenía dudas sobre que carrera seguir, siendo este curso fundamental en mi elección final, de la cual no me arrepiento.

No puedo dejar de mencionar a mi familia, a mi madre y mi padre por darme ese empujón inicial en mi paso por el colegio y el liceo, siempre preocupados de mi desarrollo intelectual, así como también del personal, permitiéndome tomar importantes decisiones acerca de cómo distribuir mi tiempo, sin generarme problemas para poder salir con mis amigos, practicar deporte u otros. También por supuesto mis hermanos mayores, que siempre estuvieron presentes y en quienes vi un modelo a seguir en momentos claves de mi vida.

Agradecer también a los grandes amigos que hice en mi paso por la escuela, y que no dudo seremos grandes amigos por toda la vida, gracias Gato, Marcelo, Naviles, Luci, Caro, Margus, Dani y Jesa por todos los momentos vividos, los almuerzos en el patio, los cumpleaños organizados, las jornadas de estudio y otras donde no se estudió nada jaja.

De manera especial quiero agradecerle al Club Social y Deportivo Colo-Colo, del cual soy un orgulloso socio, por siempre estar ahí, siendo una importante parte de mi vida, brindándome enormes alegrías y en momentos grandes penas. Además agradecer a The Beatles, por su música perfecta e inigualable, inspiradora en cualquier momento de la vida y gran compañía en mis largas noches de trabajo para esta memoria.

Finalmente agradecerle a la mujer que fue mi gran compañía en este camino, que me apoyo en los momentos más difíciles en que yo no sabía qué hacer ni que decisiones tomar, siendo un pilar fundamental para mí y gran compañera en los momentos alegres también, muchas gracias Paola, esto también es tuyo.

## Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organización de la memoria.....	3
2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Introducción a los modelos hidrológicos.....	4
2.2 Modelo VIC.....	5
2.3 Modelo “Route”.....	12
2.4 Pronóstico actual.....	14
3. Caracterización de la zona de estudio.....	19
3.1 Elección de la cuenca.....	19
3.2 Descripción general de la zona.....	22
3.2.1 Geomorfología.....	22
3.2.2 Suelos.....	22
3.2.3 Clima.....	22
3.2.4 Hidrogeología.....	23
3.3 Información hidrometeorológica disponible.....	23
3.3.1 Información fluviométrica.....	23
3.3.2 Información Pluviométrica.....	24
3.3.3 Información de Temperaturas.....	24
3.3.4 Información de viento.....	24
4 Información requerida para la modelación.....	26
4.1 Parámetros generales VIC.....	26
4.1.1 Archivos de vegetación.....	26
4.1.2 Bandas de elevación.....	29
4.1.3 Parámetros de suelo.....	29
4.1.4 Parámetros globales.....	33
4.2 Variables forzantes.....	34
4.2.1 Precipitación.....	35
4.2.2 Temperatura.....	37
4.2.3 Viento.....	43
5 Modelación Hidrológica.....	45
5.1 Calibración y Validación.....	45
5.2 Pronóstico.....	55
5.2.1 Periodo de deshielo 2010-2011.....	55

5.2.2 Periodo de deshielo 2011-2012 .....	57
5.3 Comparación con pronóstico DGA.....	59
6 Conclusiones.....	61
6.1 Conclusiones generales.....	62
6.2 Comentarios sobre la información disponible .....	62
6.3 Comentarios sobre parámetros y variables forzantes.....	63
6.4 Resultados de la modelación hidrológica.....	63
6.5 Resultados de la actualización del pronóstico .....	64
6.6 Recomendaciones .....	64
7 Referencias Bibliográficas.....	66
ANEXO A Correr VIC .....	68
ANEXO B Correr modelo de ruteo .....	69
ANEXO C Pronóstico actual DGA.....	70
ANEXO D Anexos Digitales.....	73

## Índice de figuras

Figura 2.1 Clasificación de modelos de cuencas (modificado de Singh, 1995).....	6
Figura 2.2 Representación de celda modelo VIC (Gao et al, 2009) .....	7
Figura 2.3 Almacenamiento (Maurer, 2011).....	8
Figura 2.4 Aproximación de Penman Monteith (Maurer, 2011).....	9
Figura 2.5 Tipos de suelos según texturas.....	9
Figura 2.6 distribución típica de suelos .....	10
Figura 2.7 Simulación de nieve en VIC (Gao et al, 2009) .....	10
Figura 2.8 Porcentaje de nieve según temperatura.....	11
Figura 2.9 Nueva nieve .....	11
Figura 2.10 Esquema modelo Route.....	12
Figura 2.11 Resumen funcionamiento de VIC y Route .....	13
Figura 2.12 Comparación caudales 1999-2000 a 2010-2011 en la cuenca de Aconcagua en Chacabucito .....	15
Figura 2.13 Frecuencia estacional de errores Pronóstico actual DGA en la cuenca de Aconcagua en Chacabucito .....	17
Figura 2.14 Frecuencia mensual de errores Pronóstico actual DGA en la cuenca de Aconcagua en Chacabucito .....	17
Figura 2.15 Error estacional en el tiempo, Aconcagua en Chacabucito.....	18
Figura 3.1 Ubicación Gran cuenca del Río Aconcagua.....	20
Figura 3.2 Curva Hipsométrica, Aconcagua en Chacabucito.....	20
Figura 3.3 Mapa topográfico Cuenca del Río Aconcagua en Chacabucito .....	21
Figura 3.4 Curva de Variación Estacional Aconcagua en Chacabucito .....	24
Figura 3.5 Posición geográfica estaciones a utilizar.....	25
Figura 4.1 Vegetación cuenca Aconcagua en Chacabucito.....	28
Figura 4.2 Mapa mundial texturas de suelo (FAO).....	32
Figura 4.3 Texturas de suelo en Aconcagua en Chacabucito.....	32
Figura 4.4 Gradiente de precipitaciones respecto a estación Vilcuya, cuenca de Aconcagua en Chacabucito .....	37
Figura 4.5 Mapa de elevación digital (m.s.n.m.) de la cuenca Aconcagua en Chacabucito con la ubicación de las estaciones utilizadas .....	39
Figura 4.6 Regresión para Portillo.....	40
Figura 4.7 Regresión para Aconcagua en Chacabucito .....	41
Figura 4.8 Regresión para Vilcuya .....	42
Figura 4.9 Variación mensual de la velocidad del viento.....	44
Figura 5.1 Fotografía temperatura del aire.....	49
Figura 5.2 Fotografía Derretimiento de nieve.....	50
Figura 5.3 Fotografía escorrentía superficial.....	51
Figura 5.4 Fotografía Equivalente en agua de la nieve.....	52
Figura 5.5 Calibración y validación de caudales mensuales .....	53
Figura 5.6 Calibración y validación de caudales diarios.....	55
Figura 5.7 Comparación Caudal VIC contra observado, 2010-2011 .....	56
Figura 5.8 Comparación caudal VIC actualizado, 2010-2011 .....	57
Figura 5.9 Comparación caudal VIC contra observado, 2011-2012.....	58
Figura 5.10 Comparación caudal VIC actualizado, 2011-2012 .....	59
Figura 5.11 Comparación de caudales, 2010-2011.....	60
Figura 5.12 Comparación de caudales. 2011-2012.....	60

# 1. Introducción

## 1.1 Motivación

El recurso hídrico en su forma nival es de suma importancia para la zona central de Chile. Este se almacena en la cordillera de Los Andes, donde año a año se registran grandes cantidades de precipitación sólida, la cual en los meses de primavera y verano se transforma en caudal aprovechable para las actividades agrícolas, de agua potable y otras. Así, se produce una regulación natural de los recursos que en capacidad de almacenamiento supera por amplio margen a la regulación artificial por medio de embalses.

En la actualidad la Dirección General de Aguas (DGA) elabora anualmente un pronóstico de caudales de deshielo, con el fin de dar a conocer la situación hidrológica de las zonas de riego del país. Este pronóstico se realiza, de forma íntegra, para el periodo Septiembre a Marzo y se basa en la información de la red Hidrométrica y las estaciones fluviométricas de la DGA. En Chile, los pronósticos se han realizado mediante correlaciones simples y múltiples, utilizándose además técnicas del análisis de componentes principales (Peña H. & Nazarala B. 1985).

El pronóstico relevante para las actividades mencionadas es aquel de tipo estacional o de mediano plazo, con tal de poder estimar recursos a lo largo de un periodo de varios meses de duración. La importancia del uso de este tipo de modelos de pronósticos tiene que ver con la planificación de la gestión del recurso hídrico.

Se propone entonces el uso del modelo VIC para el pronóstico de caudales de deshielo. Este es un modelo hidrológico a macro escala, el cual ha sido ampliamente utilizado para el cálculo de escorrentía de deshielo en grandes cuencas de Estados Unidos, tales como Colorado, Seattle, entre otras, así como también en cuencas de gran tamaño en China.

Resulta importante destacar que al trabajar con un modelo a macro escala se intenta dar solución al problema de determinar la disponibilidad del recurso hídrico de cuencas grandes, seleccionándose para estos efectos la cuenca cordillerana del río Aconcagua en Chacabucito, de 2.084 km<sup>2</sup> de área y de una altitud media de 3174 m.s.n.m.

La cuenca del Aconcagua en Chacabucito pertenece a la subcuenca alta del Río Aconcagua, y su punto de salida se encuentra 8 km aguas arriba de la ciudad de Los Andes. Su importancia radica en que el caudal del río representa la entrada a la V región (Cade-Idepe, 2005). La cuenca presenta un régimen netamente nival, con caudales máximos entre noviembre y febrero, producto de los deshielos, y aguas abajo de la cuenca comienza fuertemente el uso consuntivo del recurso hídrico, asociado principalmente a la agricultura. En esta región el agua constituye una limitante importante para el riego, por lo que el conocimiento de los volúmenes de agua que se tendrán en la temporada de riego es de vital importancia. Este pronóstico es posible realizarlo a partir del mes de septiembre, pues gran parte de las precipitaciones importantes ya se han producido, de tal forma que el grueso del caudal de la temporada octubre-abril proviene del derretimiento de nieves (Espíldora et al, 1975)

La realización de esta memoria sobre pronóstico de caudales de deshielo en se enmarca en el proyecto “Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático” llevado a cabo por la División Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

El trabajo de título se enfoca a la calibración y validación del modelo hidrológico VIC en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito, enfocándose a su utilización para el pronóstico de caudales en el período de deshielo Octubre a marzo.

## **1.2 Objetivos**

En base a lo expuesto anteriormente, surge como interés principal el proponer y validar una nueva metodología para abordar el problema del pronóstico de eventos fluviométricos de deshielo en Chile.

### **1.2.1 Objetivo General**

Desarrollar e implementar una metodología de pronóstico de caudales de deshielo basada en un modelo hidrológico de base física aplicado a grandes cuencas.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Calibración y validación del modelo VIC en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito.
- Análisis comparativo con las metodologías estadísticas actuales empleadas por la DGA.
- Actualización del pronóstico, con el fin de disminuir la incertidumbre de este.



### **1.3 Organización de la memoria**

Este trabajo de memoria está organizado como se indica a continuación:

En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de los tópicos a abordar. Luego de una breve introducción, se realiza una descripción general del modelo hidrológico elegido, las aplicaciones realizadas con él, sus alcances como herramienta de investigación y sus fundamentos físicos. Se presentan también los archivos necesarios para el funcionamiento de este modelo así como también su posterior trabajo para realizar el pronóstico. Finalmente se presenta una breve reseña sobre el proceso actual de pronóstico de caudales de deshielo, mostrando su precisión en los últimos 12 años.

En el Capítulo 3 se realiza una caracterización de la zona de estudio, incluyendo una breve descripción de la misma y de sus características geomorfológicas principales. Además se muestra la información hidrometeorológica disponible, enfocándose en los parámetros requeridos por el modelo hidrológico.

En el Capítulo 4 se incluye la metodología utilizada para la distribución espacio-temporal, tanto de los parámetros generales requeridos por VIC, como de las variables forzantes para el pronóstico.

En el Capítulo 5 se presenta el trabajo de calibración y validación del modelo hidrológico en la cuenca de estudio, incluyendo la agregación espacial del modelo. Además se presenta el pronóstico generado mediante el cual se realiza una comparación con los resultados entregados por el modelo actual DGA.

Finalmente, en el Capítulo 6 se incluyen las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

## 2. Revisión Bibliográfica

### 2.1 Introducción a los modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico es una representación física o matemática confiable de los procesos hidrológicos reales que ocurren en una cuenca cuyo objeto es cuantificar los caudales entrantes a un área específica, provenientes desde sectores localizados topográficamente en áreas más altas, en tiempo y en forma que ellos ocurren.

Clásicamente se han utilizado los denominados modelos globales o agregados, que tratan la cuenca como si fuese una sola unidad, con una única entrada de lluvia (lluvia promedio), donde el caudal de salida se reproduce a partir de una dinámica global del sistema.

Existe una gran cantidad de modelos globales que se pueden integrar dentro de la teoría de sistemas que considera que la cuenca es un sistema lineal, particular e invariante en el tiempo, donde sólo una parte de lluvia efectiva produce escorrentía, afectada por los procesos de evaporación, retención y infiltración que se recogen dentro de la función de pérdidas o función de producción.

Esta modelización tiene poca base física, puesto que obvia el hecho de que parte de la escorrentía superficial puede infiltrarse al pasar por un cauce permeable, y subestima la componente subsuperficial del caudal. Además, la identificación del HU no es sencilla. A partir de información hidrológica disponible de la cuenca (datos de lluvia y caudal), el HU se puede derivar de la solución del problema inverso, estos datos no siempre están disponibles con la suficiente cantidad y calidad, y además arrastran la descripción espacial limitada de la lluvia. En el intento de evitar este problema, ha tenido lugar la conceptualización de la cuenca en sistemas más sencillos de manera que se pueda derivar del hidrograma unitario que depende de pocos parámetros, los cuales pueden ser estimados por técnicas estadísticas; estos son los denominados modelos agregados conceptuales. Un paso adelante en este sentido han sido los esfuerzos al ligar los parámetros del HU conceptual con relaciones geomorfológicas y que han dado lugar a la aparición del Hidrograma Unitario Geomorfológico a partir de las características físicas de la cuenca, sin necesidad de tener datos hidrológicos medidos (Corral, 2004).

En un intento de representar los procesos con una mayor base física, en los años 60 aparecieron unos modelos que se pueden denominar modelos agregados con base física. Estos consisten en una sucesión de elementos conceptuales interconectados que representan la respuesta de diferentes subsistemas del ciclo hidrológico (evaporación, escorrentía en medio saturado, escorrentía superficial en canal), aún cuando el número de parámetros involucrados es muy grande, la descripción es demasiado simplificada haciendo que no exista demasiada diferencia entre este tipo de modelos y los modelos conceptuales agregados.

Las posibilidades actuales ofrecen una línea a medio camino entre los dos extremos. Los denominados modelos de parámetros distribuidos, que se caracterizan por la división de la cuenca en subunidades menores más homogéneas, donde se aplica un modelo agregado. La respuesta global de la cuenca se compone a partir de las

contribuciones de las diferentes subunidades. Una primera clasificación, en este tipo de modelos se podría hacer por la manera de hacer la división en subunidades, que puede ser en subcuencas o en subunidades artificiales siguiendo algún criterio establecido. El hecho que a cada subunidad se aplique un modelo global hace que este tipo de modelos se denominen modelos distribuidos pero conceptualmente globales. Sin embargo, la modelización hidrológica distribuida es un campo de estudio en pleno desarrollo en todo el mundo, y existen muchas variantes, filosofías y escuelas. Por ejemplo, una variante de los modelos distribuidos, es la que intenta formular una integración entre las subunidades de manera que quede representada la espacialidad de las variables de manera sencilla.

La figura 2.1 muestra la clasificación de modelos expuesta, diferenciándolos por procesos, escala y método de solución, de esta forma se elige el tipo de modelo que se desea utilizar en base a los criterios mostrados y las características particulares de la cuenca de estudio.

## **2.2 Modelo VIC**

Variable Infiltration Capacity **VIC** (Liang et al., 1994) es un modelo hidrológico de macro escala el cual resuelve balances hídricos y de energía, Originalmente desarrollado por Xu Liang en la Universidad de Washington, VIC es un modelo de investigación y en sus variadas formas ha sido aplicado a variadas cuencas incluyendo las del Río Columbia, Río Ohio, Río Arkansas-Red y los Ríos del alto Mississippi, así como también en otros lugares del mundo. El desarrollo y mantención de la versión oficial actual de VIC es manejada por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Washington, bajo la dirección de Dennis P. Lettenmaier.

En VIC la unidad de trabajo básica se denomina celda, y puede ser asimilada como el equivalente a la unidad de respuesta hídrica, ya que VIC exige la independencia de flujos entre cada celda a ser ingresada, realizando un balance energético en cada celda independientemente.

El paso de tiempo utilizado por el modelo depende de si el balance realizado es de masa o energético, siendo el valor del paso de tiempo de un día en el primer caso, y menor a un día en el segundo.

En el presente estudio se trabaja con una celda de VIC de 5 kilómetros de extensión en sus lados y con un paso de tiempo de 8 horas.

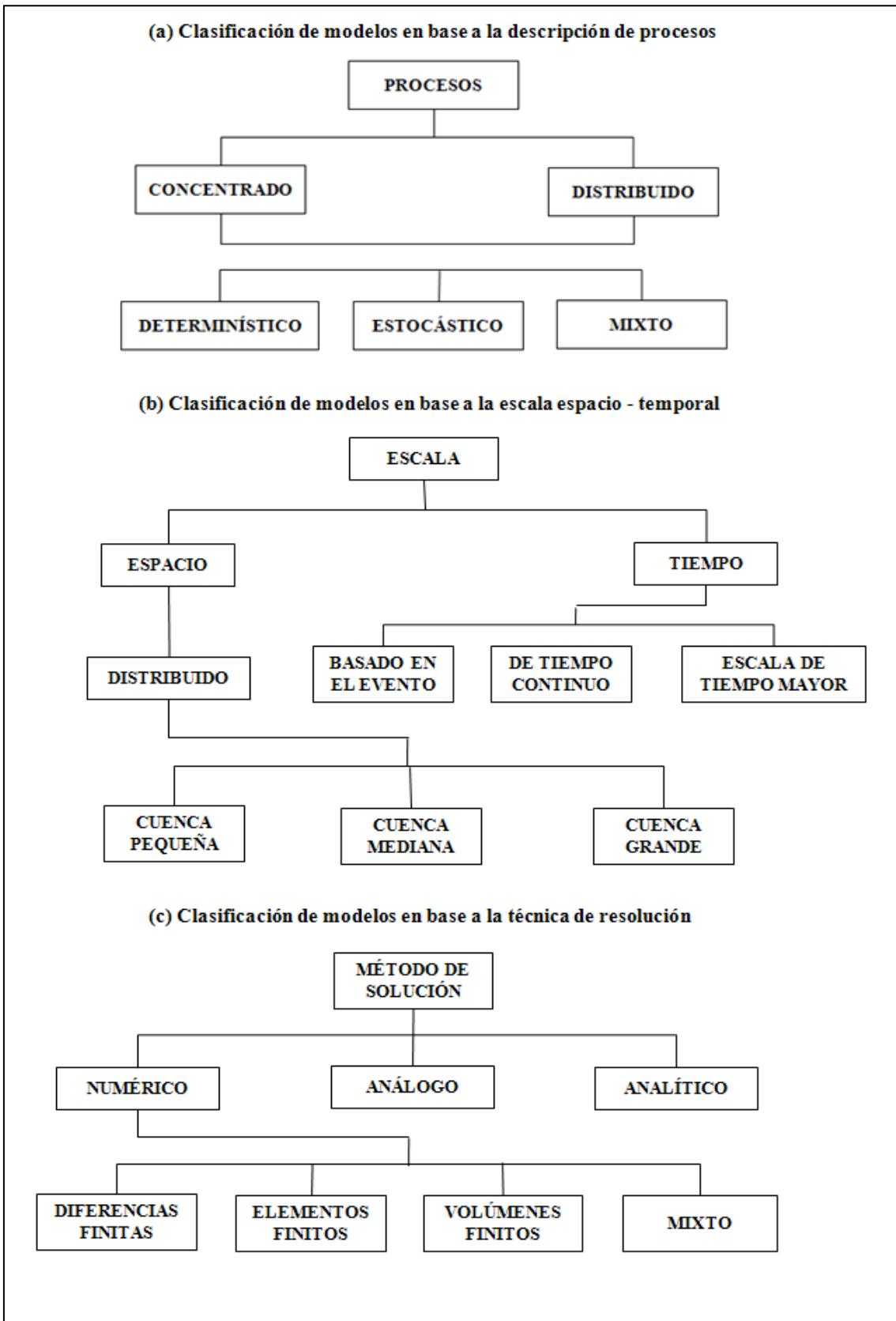


Figura 2.1 Clasificación de modelos de cuencas (modificado de Singh, 1995)

La figura 2.2 muestra la estructura de la cada celda en VIC, por lo que la cuenca que se quiere modelar debe ser grillada de acuerdo a un tamaño de celda definido. Cada celda entonces simula procesos hídricos y energéticos, por lo que cada una de estas debe contar con todos los parámetros forzantes necesarios para la correcta simulación de los procesos.

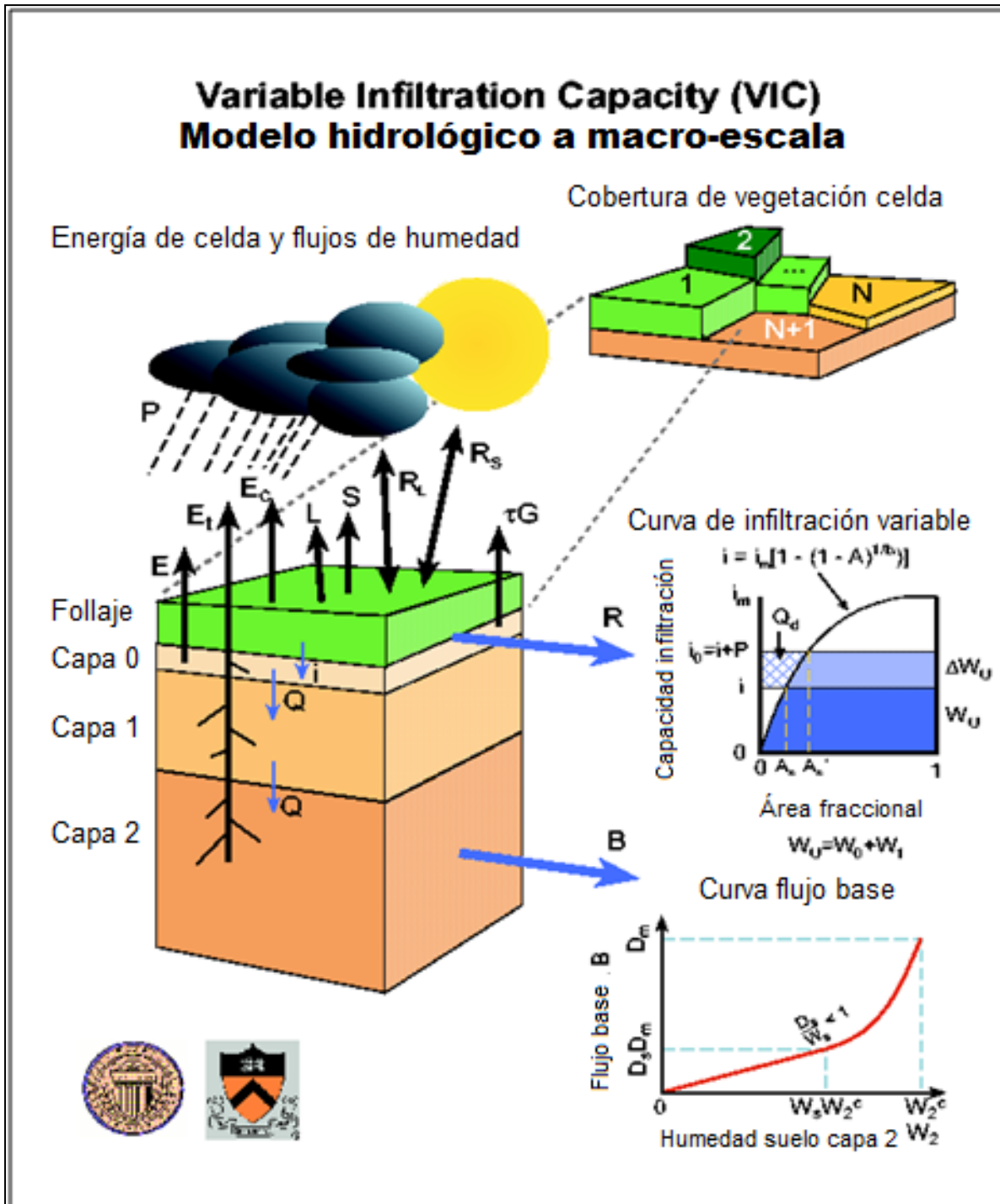


Figura 2.2 Representación de celda modelo VIC (Gao et al, 2009)

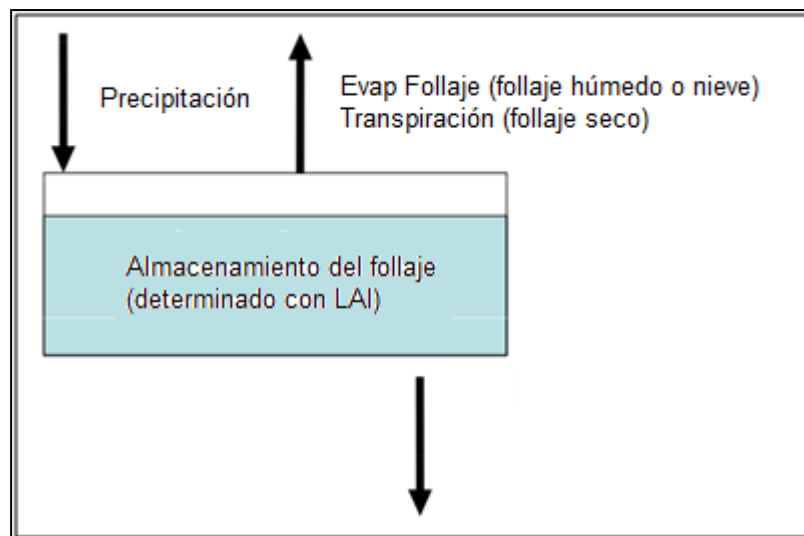
Las celdas no interactúan entre sí en la fase de balance energético. Esto requiere una serie de supuestos, siendo el más importante que los flujos verticales son mucho más grandes que los horizontales. Así también se considera que el flujo subterráneo es pequeño en relación al de superficie y tanto el subsuperficial como el proveniente de lagos y humedales no tienen aportes significativos a los canales, y las inundaciones sobre las planicies no son importantes.

Este tipo de supuestos son cumplidos satisfactoriamente toda vez que el tamaño de la celda es lo suficientemente grande. Este tamaño es variable según la cuenca a estudiar y se recomienda que se encuentre en el rango de 1 km a 2° de circunferencia (~200 km).

Los parámetros a definir para cada celda son variables dependiendo de la zona de estudio, sin embargo existen parámetros fijos que siempre deben mostrarse, tales como la vegetación y los parámetros de suelo. Además de esto existen variables meteorológicas que deben presentarse también, como la precipitación y las temperaturas mínimas y máximas en cada celda, para un paso de tiempo previamente definido, a esto se le puede agregar variables como la velocidad del viento, humedad, albedo, radiación entre otras.

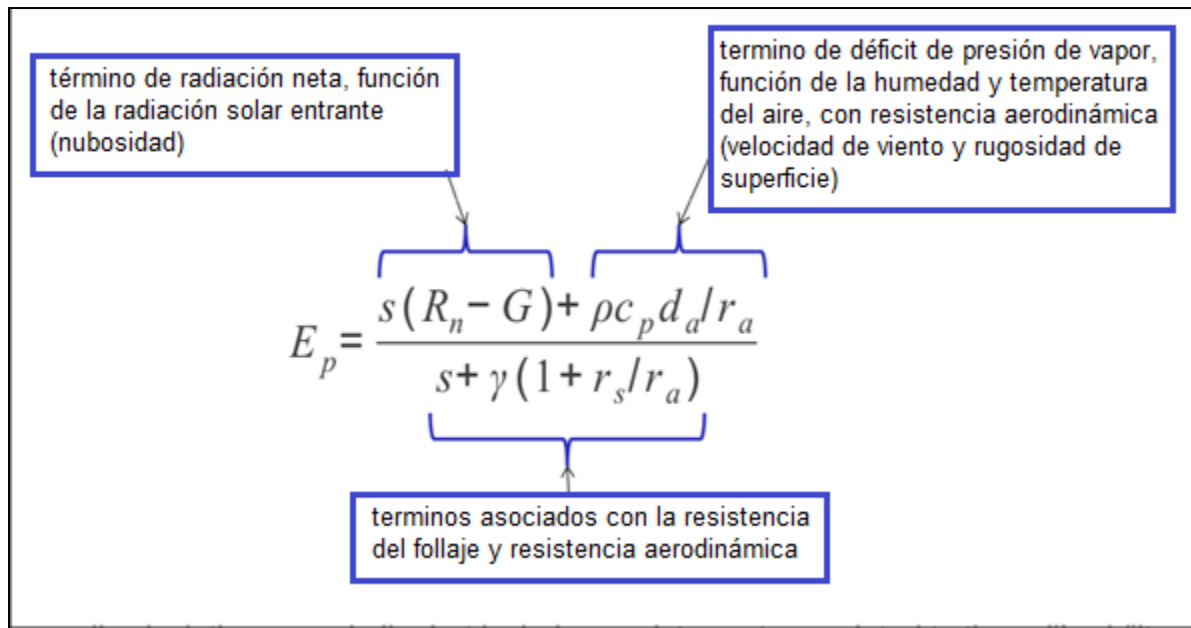
La representación de la vegetación es mediante el uso de una librería de parámetros, el cual se basa en el índice de área de follaje, o Leaf Area Index (LAI), esto entrega los valores de follaje relevantes.

En la figura 2.3, el escurrimiento adicional se genera cuando la precipitación supera la capacidad de almacenamiento en el paso de tiempo.



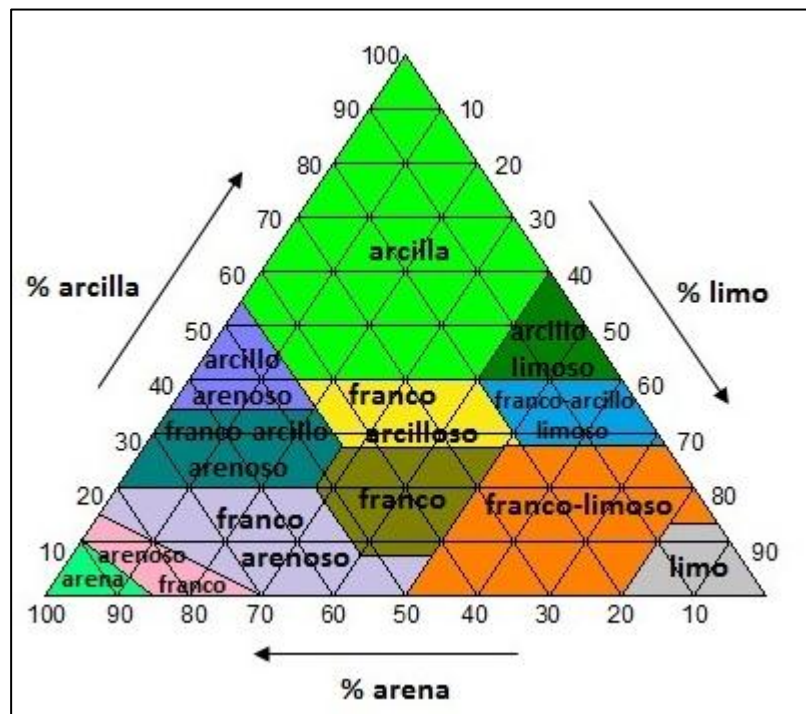
**Figura 2.3 Almacenamiento (Maurer, 2011)**

La evapotranspiración en VIC se define bajo tres componentes para cada tipo de vegetación, estos son la evaporación de la cubierta húmeda, la transpiración de la cubierta seca y la evaporación del suelo de cubierta desnuda. La evaporación de la vegetación húmeda y la transpiración de la vegetación seca son estimadas la aproximación física de Penman Monteith, de acuerdo a lo señalado en la figura 2.4.



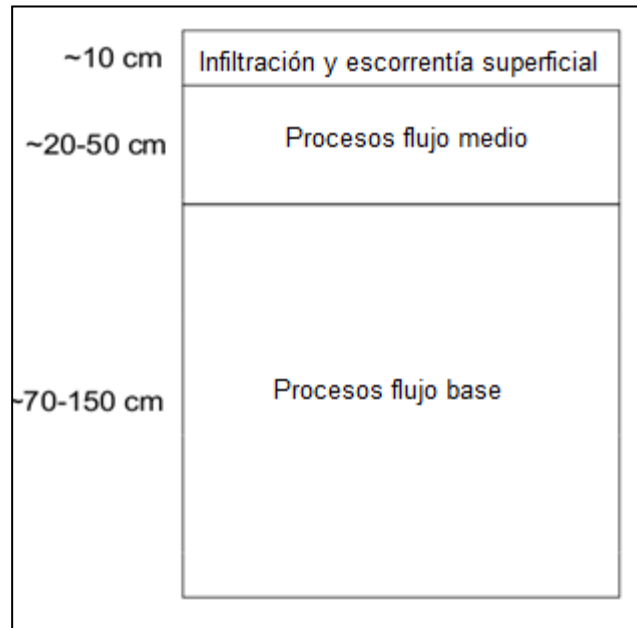
**Figura 2.4 Aproximación de Penman Monteith (Maurer, 2011)**

En cuanto a los suelos, su parametrización se basa en las texturas de suelo, información que se extrae desde La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La composición del suelo es utilizada para estimar porosidad, saturación, capacidad de campo, marchitamiento, capacidad residual y otros parámetros para casos no saturados. Los tipos de suelos existentes según su textura se muestran en la figura 2.5, dependiendo estos de su porcentaje de arcilla, limo y arena.



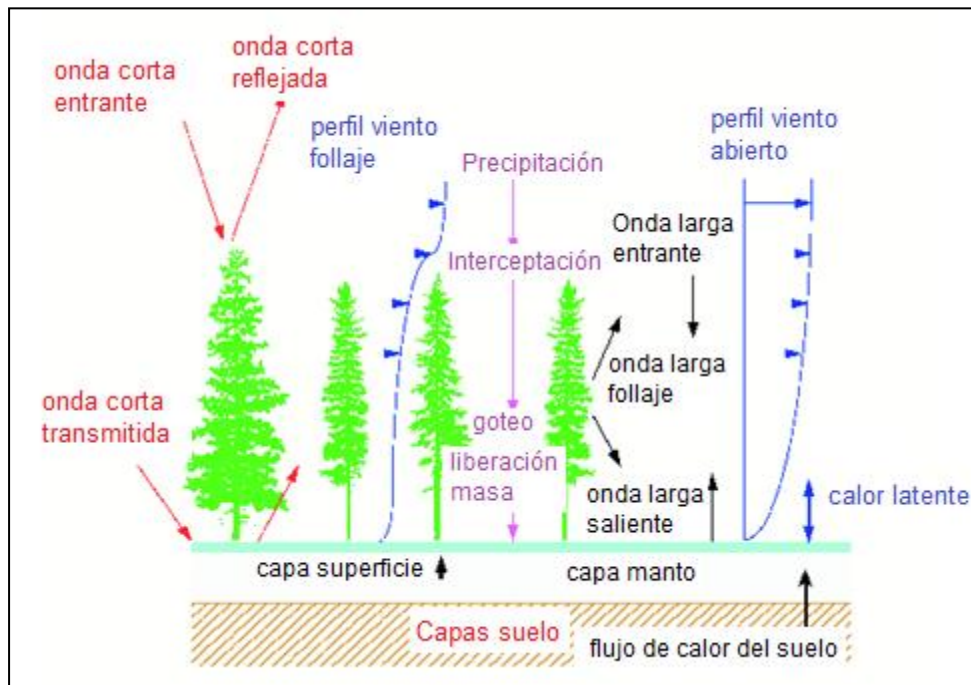
**Figura 2.5 Tipos de suelos según texturas**

Cada celda además tiene una distribución interna de 3 capas, las cuales se definen por profundidad y son las encargadas de modelar los procesos entre flujos. La figura 2.6 muestra la distribución típica de capas.



**Figura 2.6 distribución típica de suelos**

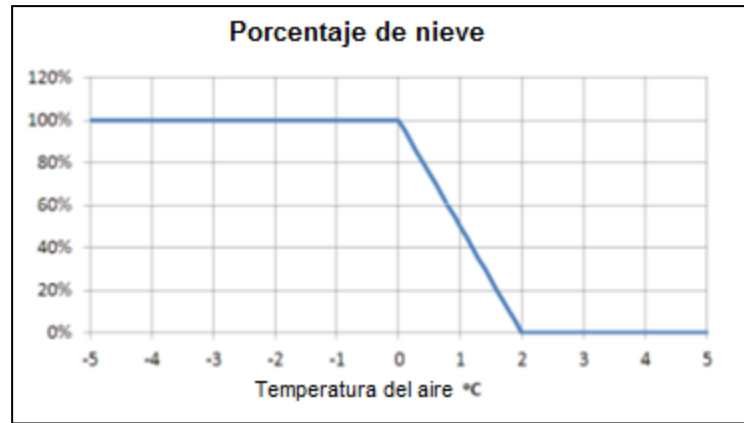
Para la simulación de nieve en VIC, éste cuenta con un módulo especial, el cual usa dos capas para el balance de energía en la superficie de nieve (una capa delgada en la superficie y otra capa en el manto de nieve), así modela la acumulación y derretimiento. Esto incluye radiación de onda corta, onda larga, calor latente y energía convectiva.



**Figura 2.7 Simulación de nieve en VIC (Gao et al, 2009)**

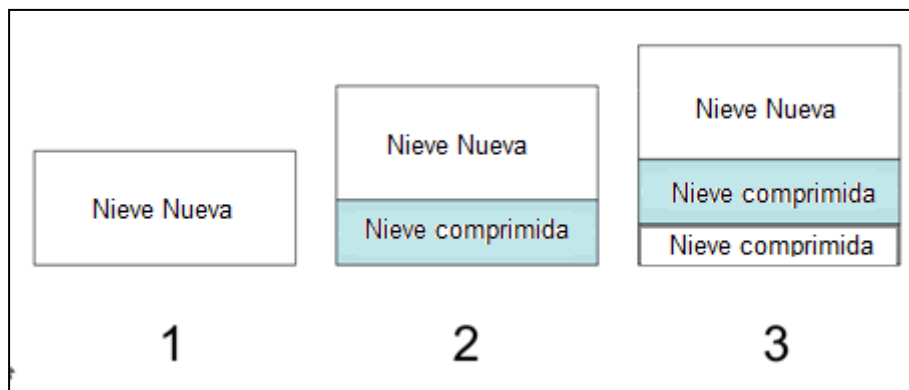


El modelo utiliza una partición simple de temperatura para diferenciar precipitación líquida de sólida, asociando a lluvia todos los valores presentados sobre 2° C y a nieve los valores bajo 0° C, con una variación lineal entre estos valores. Estos valores se encuentran fijados en el código de VIC y pueden ser modificados si así se necesitara, para el presente trabajo no sufrieron variaciones.



**Figura 2.8 Porcentaje de nieve según temperatura**

La simulación de nieve nueva supone una compresión de la ya existente, mediante la utilización de un algoritmo recursivo que consiste en ir generando capas de nieve comprimida a medida que se tiene nieve nueva en el sistema. De la misma manera el modelo disminuye el albedo a medida que aumenta la edad de la nieve.



**Figura 2.9 Nueva nieve**

Donde la sublimación de la nieve está dada por:

$$\frac{dW_e}{dt} = P - M - p * Q_v - Q_e \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde: P= Precipitación  
M= Masa de nieve  
Qv= Caudal unitario [m<sup>3</sup>/s/m]  
Qe= caudal [m<sup>3</sup>/s]

El cálculo de caudales mediante VIC consta de dos fases, la primera de ellas es el balance de energía en cada una de las unidades de subdivisión de la cuenca, para luego dar paso al rastreo del caudal, mediante la herramienta "route", desarrollada conjuntamente con VIC y utilizada como complemento a éste para obtener valores de salida.

### 2.3 Modelo "Route"

Una vez realizado el proceso de balance de masa y energético en cada celda, se procede a relacionar las celdas entre sí, para de esta forma poder generar un caudal en el punto de salida de la cuenca, como se muestra en la figura 2.10, para esto el programa Route utiliza la información topográfica de la cuenca, así como también archivos de dirección de flujo en cada celda.

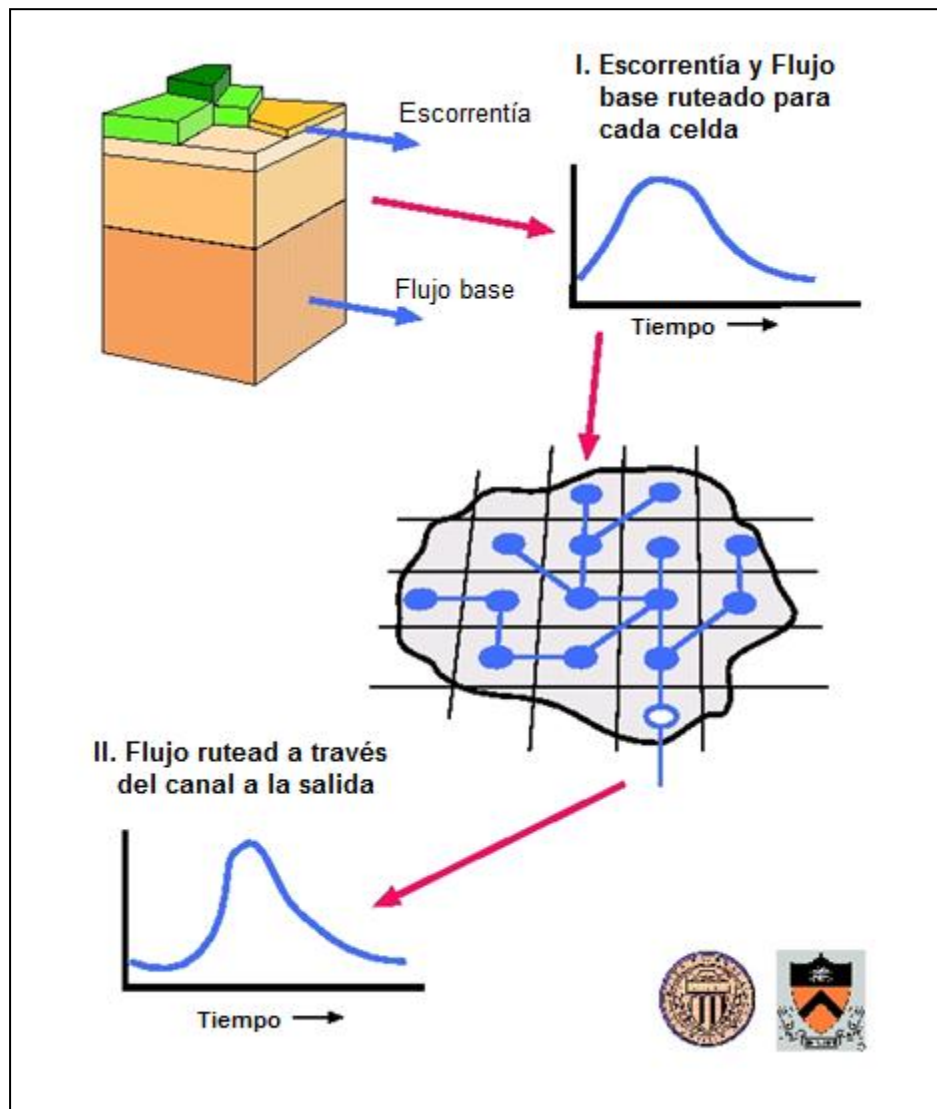


Figura 2.10 Esquema modelo Route

Una vez que se tiene el valor de caudal en el punto de salida determinado, se logran generar hidrogramas dependientes del paso de tiempo previamente fijado.

Finalmente la figura 2.11 muestra un resumen general de ambos procesos, VIC y Route, con los parámetros que necesitan y los archivos que entregan, donde cada cuadro corresponde a un archivo de texto, cuya generación se detalla en el capítulo 4 del presente trabajo.

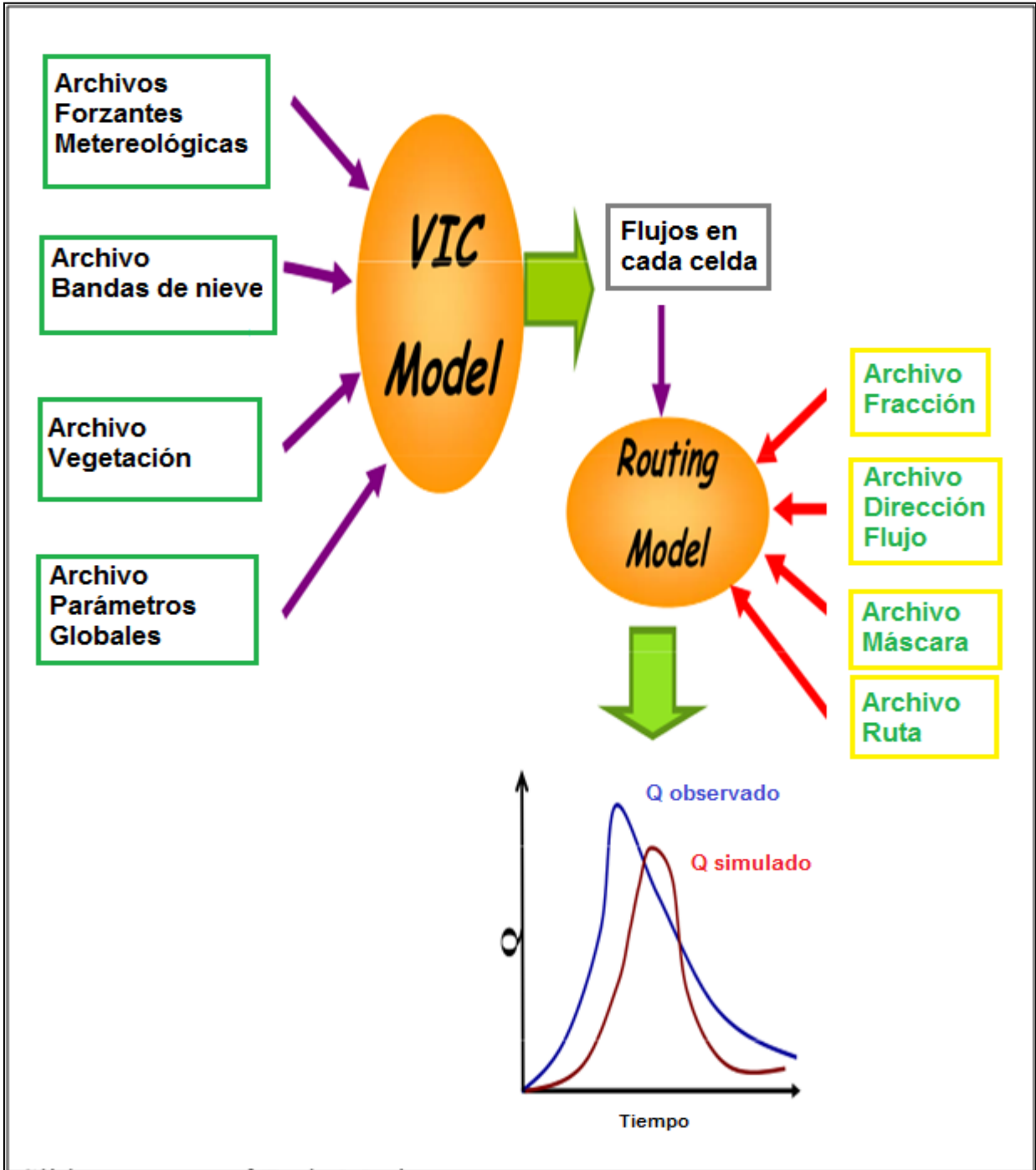


Figura 2.11 Resumen funcionamiento de VIC y Route

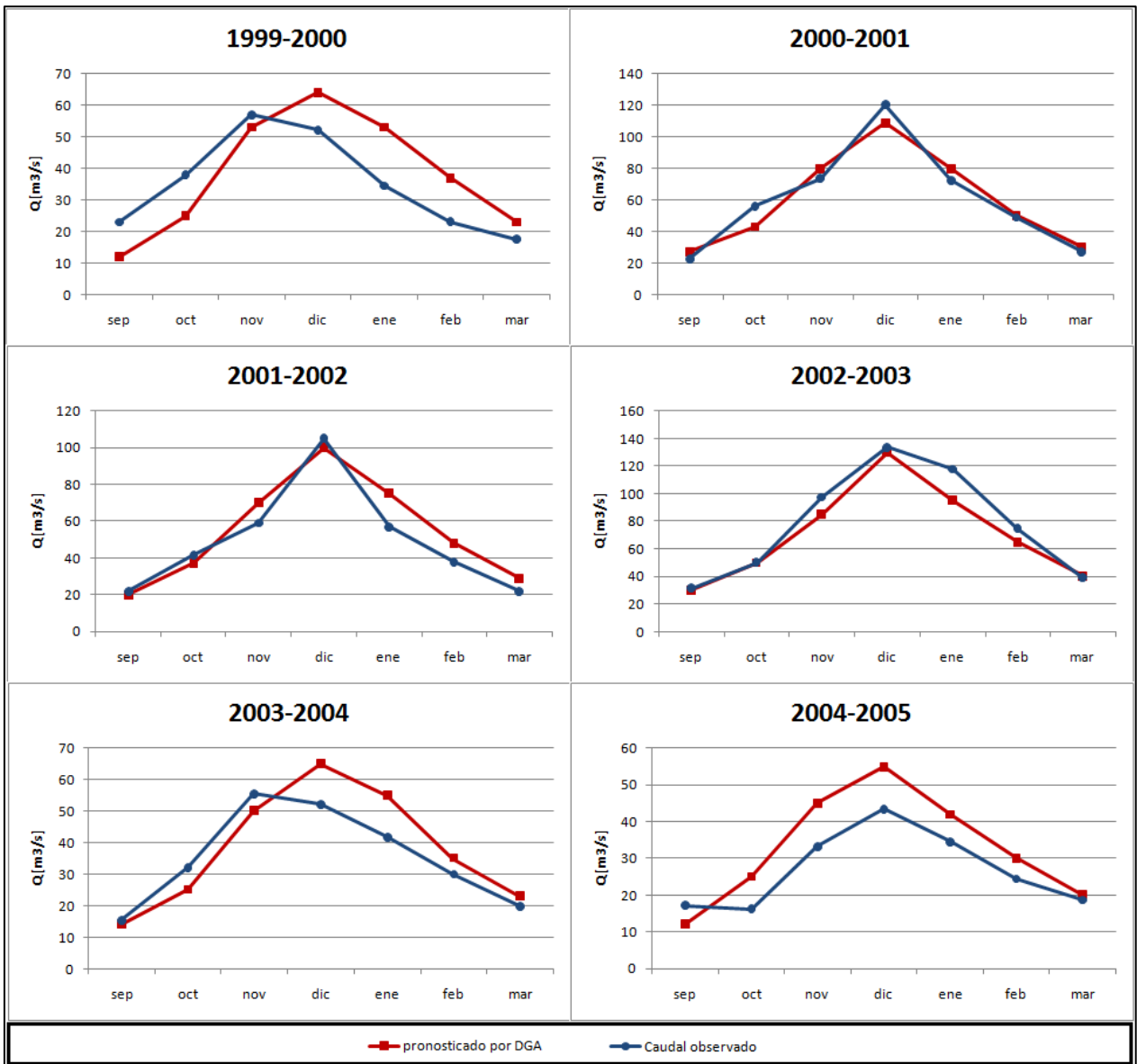
## 2.4 Pronóstico actual

En la actualidad la Dirección General de Aguas (DGA) elabora anualmente un pronóstico de caudales de deshielo, el fin de dar a conocer la situación hidrológica de las zonas de riego del país. Este pronóstico se realiza, de forma íntegra, para el periodo Septiembre a Marzo y se basa en la información de la red Hidrométrica y las estaciones fluviométricas de la DGA. En Chile, los pronósticos se han realizado mediante correlaciones simples y múltiples, utilizándose además técnicas del análisis de componentes principales (Peña H. & Nazarala B. 1985).

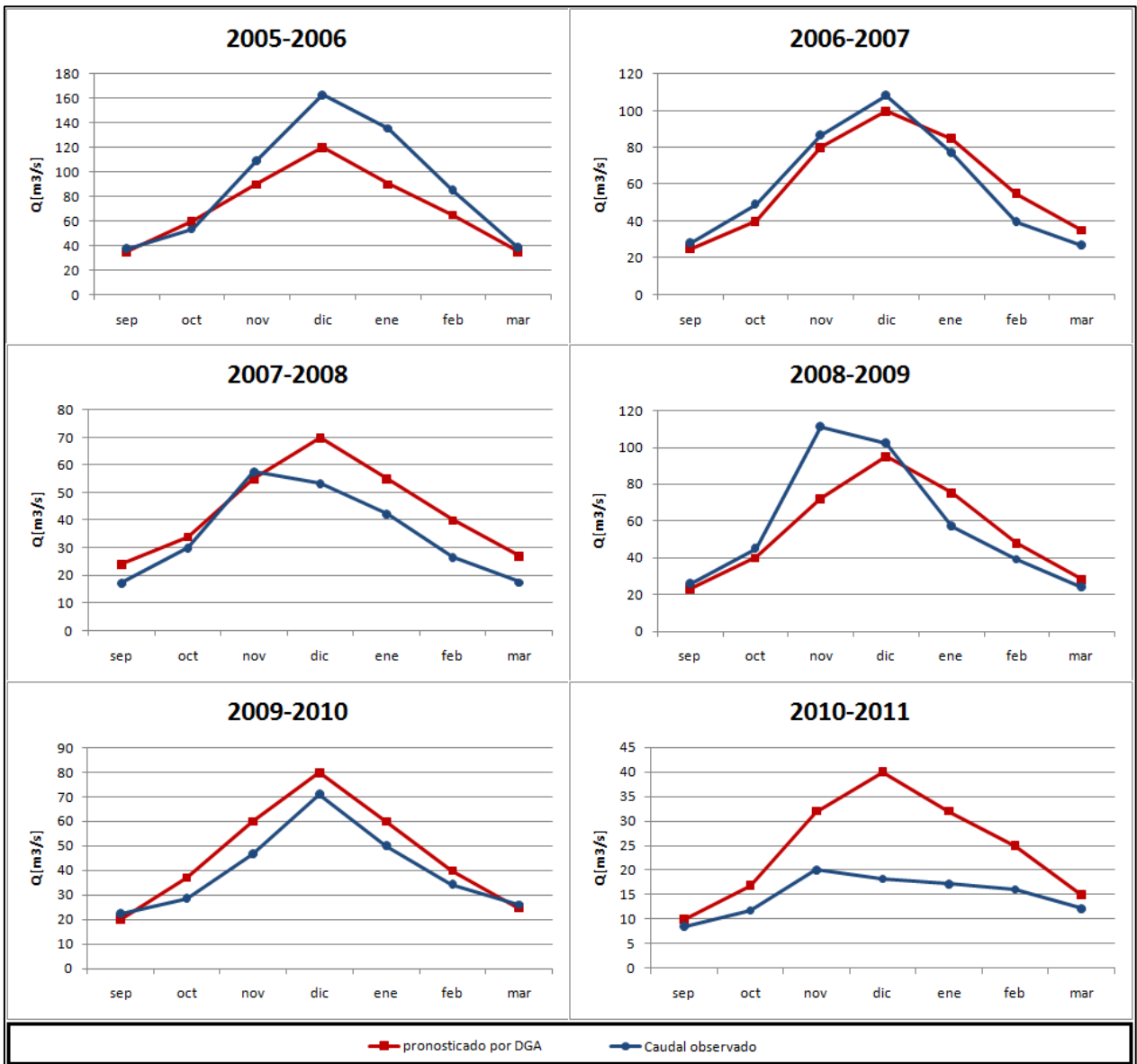
Un análisis del registro histórico de pronósticos y los valores observados de la DGA permite realizar una comparación cuantitativa entre estos valores, en el periodo de deshielo desde el año hidrológico 1999-2000 hasta 2010-2011.

La comparación mes a mes durante cada periodo se muestra en la figura 2.12, además de esto las figuras 2.13 y 2.14 representan un histograma basado en el periodo de comparación, donde se puede apreciar con la frecuencia que se tiene las distintas magnitudes de error del pronóstico a nivel estacional y mensual de la DGA respectivamente. De la figura 2.12 se desprende que el pronóstico DGA tiene un comportamiento diferente para años secos y para años húmedos, siendo de mayor precisión en estos últimos, teniéndose errores en años secos dos o hasta tres veces más grandes que en años húmedos.

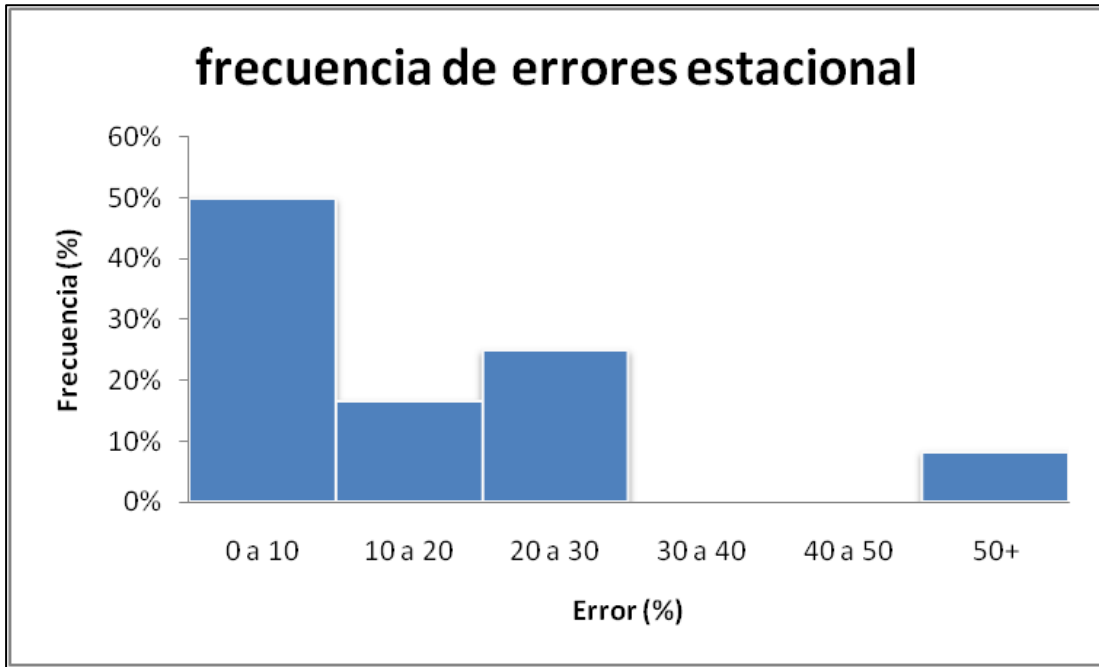
Se observa que la mayor parte de las veces el error del pronóstico tanto estacional como mensual es inferior al 10%, catalogado como bueno, sin embargo preocupa el alza en la frecuencia de los errores sobre un 50%. La figura 2.15 presenta un análisis temporal del error estacional, donde se logra ver un alza en el error en los últimos años, basado en el hecho que estos fueron del tipo seco, siendo entonces esta la condición principal a la hora de analizar la precisión del pronóstico.



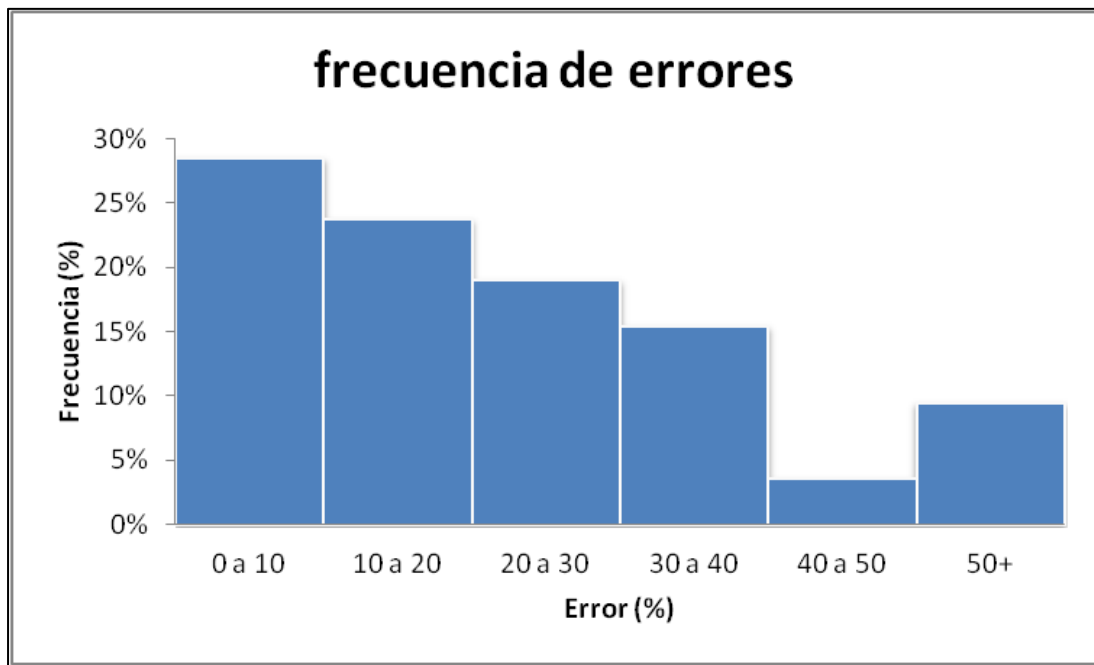
**Figura 2.12 Comparación caudales 1999-2000 a 2010-2011 en la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito**



**Figura 2.12 (continuación) Comparación caudales 1999-2000 a 2010-2011 en la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito**



**Figura 2.13 Frecuencia estacional de errores Pronóstico actual DGA en la cuenca de Aconcagua en Chacabucito**



**Figura 2.14 Frecuencia mensual de errores Pronóstico actual DGA en la cuenca de Aconcagua en Chacabucito**



**Figura 2.15 Error estacional en el tiempo, Aconcagua en Chacabucquito**



### **3. Caracterización de la zona de estudio**

#### **3.1 Elección de la cuenca**

La cuenca a estudiar corresponde a la del Río Aconcagua en Chacabucuito, la cual es una subcuenca de la gran cuenca del Río Aconcagua. La hoya del río Aconcagua se desarrolla en el extremo sur de la zona de los Valles Transversales o Semiárida, en la V Región de Valparaíso (Figura 3.1). El río Aconcagua, se forma al juntarse los ríos Juncal y Blanco, recibiendo aguas abajo el mayor aporte andino proveniente del río Colorado por su lado norte. La cuenca del Aconcagua en Chacabucuito pertenece a la subcuenca alta del Río Aconcagua, y su punto de salida se encuentra 8 km aguas arriba de la ciudad de Los Andes.

La importancia económica de esta cuenca radica en el hecho que a partir del punto de salida, Aconcagua en Chacabucuito, comienza una alta demanda de agua para el desarrollo del sector agrícola en la región, siendo este uso el más importante en la zona, y por otro lado la agricultura de la región es fundamental en el desarrollo a nivel país. Es importante notar que aguas arriba del punto de salida de la cuenca se cuenta con un importante número de centrales hidroeléctricas, las cuales al ser de uso no consuntivo no afectan de manera relevante el caudal a la salida de la cuenca en función de los procesos hidrológicos que suceden en la misma. Además de esto se tiene uso de tipo minero, el cual es puntual por lo que no afecta el desarrollo entre celdas. Por otro lado el uso domestico en la cuenca de estudio no es significativo como para incluirlo en la modelación.

Es por esto que se hace de vital necesidad poder estimar de forma lo más precisa posible el caudal que se tendrá en los meses de primavera y verano, meses donde el caudal adquiere sus máximos valores anuales (la cuenca es de régimen netamente nival), pues es esta época donde el desarrollo agrícola alcanza su máximo de demanda.

En la zona central, la Cordillera de Los Andes se presenta con grandes altitudes y un ancho considerable, lo que provoca que existan grandes acumulaciones de nieve y un gran número de glaciares de montaña. Sus mayores alturas se encuentran en la región de Valparaíso en la parte alta del Aconcagua. En el sector se registran grandes acumulaciones nivales y numerosos glaciares de tamaño medio o pequeño.

La curva hipsométrica de Aconcagua en Chacabucuito se muestra en la figura 3.2, donde se puede que la mayor parte de la cuenca, aproximadamente un 80%, se desarrolla entre los 1000 y 4000 m.s.n.m. El detalle topográfico de la cuenca se presenta en la figura 3.3. Además la tabla 3.1 muestra las principales características de la misma.

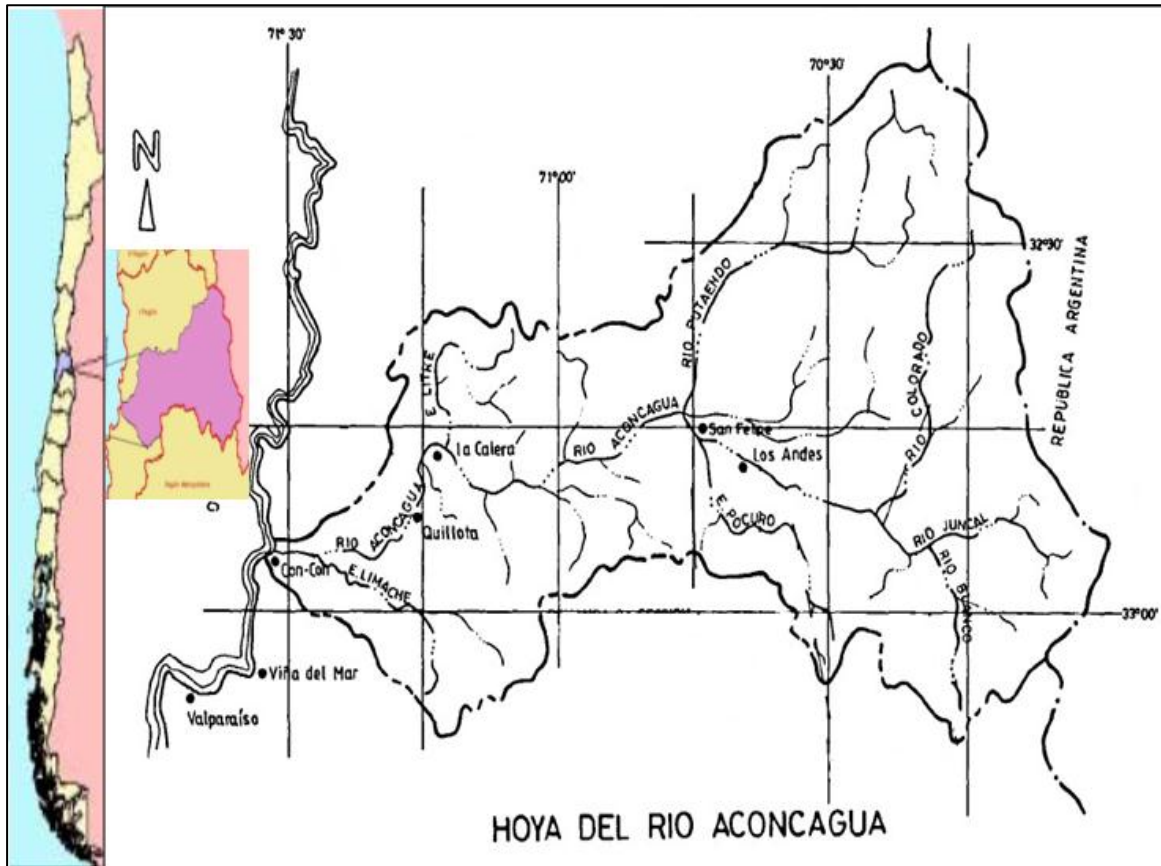


Figura 3.1 Ubicación Gran cuenca del Río Aconcagua

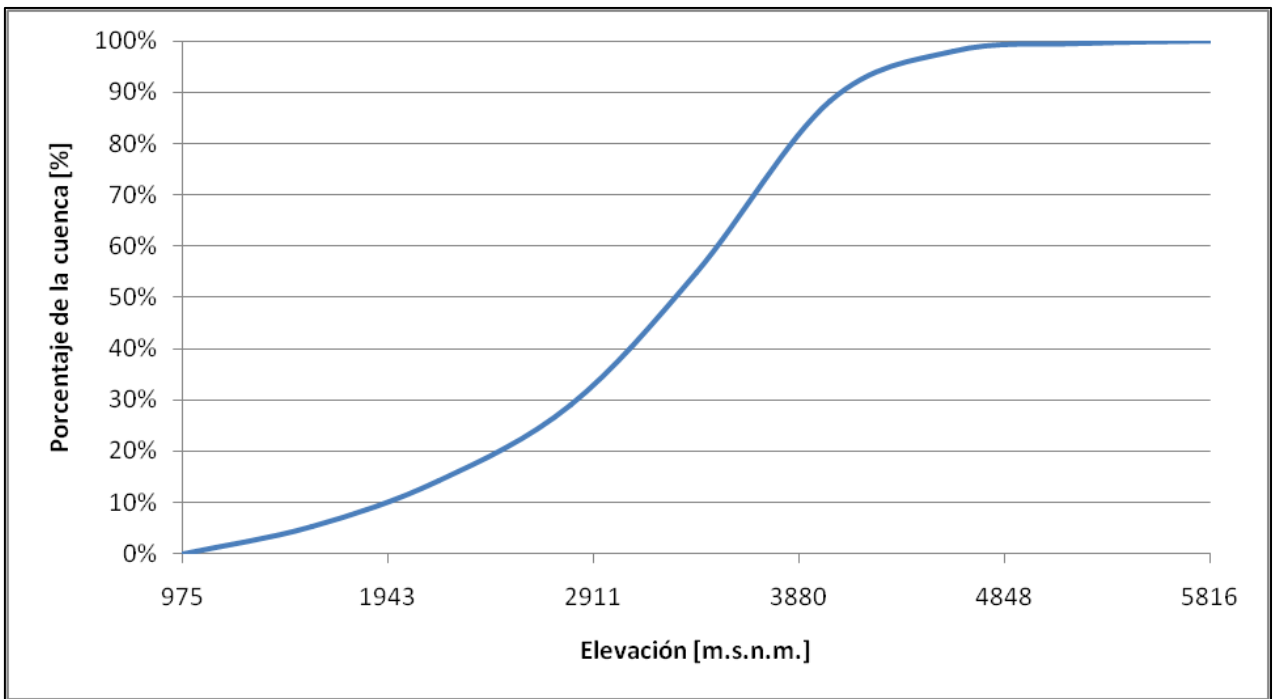
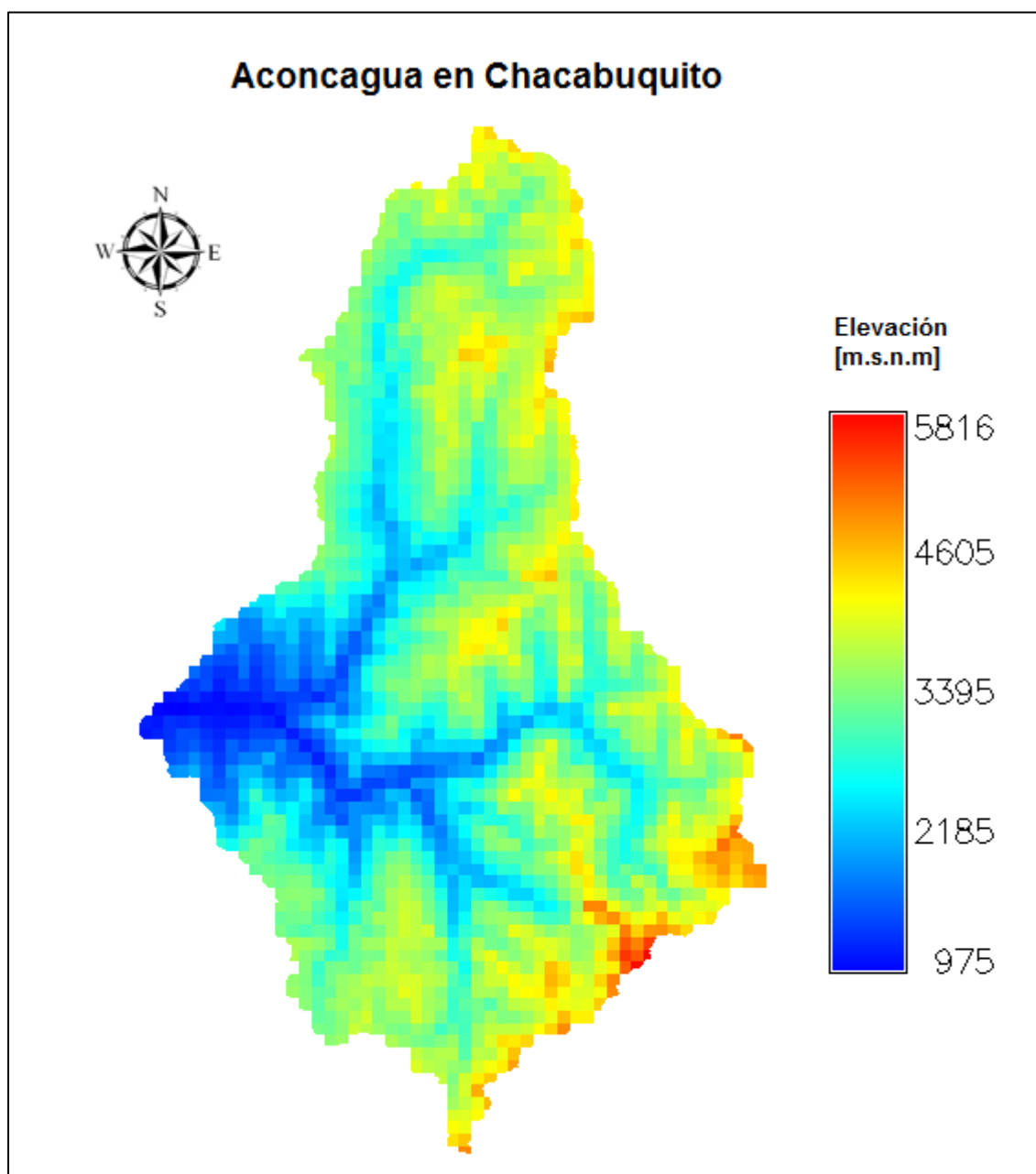


Figura 3.2 Curva Hipsométrica, Aconcagua en Chacabuco

**Tabla 3.1** Características de la cuenca.

Área [km <sup>2</sup> ]	2084
Altura máxima [m.s.n.m]	5816
Altura mínima [m.s.n.m]	941
Altitud media [m.s.n.m]	3174
Pendiente media [%]	26,7



**Figura 3.3** Mapa topográfico Cuenca del Río Aconcagua en Chacabuco

## **3.2 Descripción general de la zona**

### **3.2.1 Geomorfología**

El río Aconcagua escurre por el último de los valles que conforman la zona de los Valles Transversales de la Quinta Región, y está separado del Núcleo o Valle Central por el Cordón de Chacabuco. El elemento fisiológico predominante en la cuenca de estudio es la Cordillera de los Andes, en un sector donde ésta alcanza elevaciones excepcionales, como son los cerros Juncal (6.110 m); Alto de los Leones o Cabeza de León (5.400 m.) y el macizo del Aconcagua (7.021 m.).

La erosión fluvial ha reemplazado los sedimentos que la formaban por materiales más recientes. El río ha mantenido una divagación continua con clara tendencia a la meandrización, situación que está particularmente clara en tiempos históricos (Cade-Idepe, 2004).

### **3.2.2 Suelos**

El paisaje geomorfológico donde se han formado los suelos de este valle es bien característico. El valle es relativamente amplio los suelos aluviales recientes, el constante relleno del cauce del río con rodados, ha originado un solevantamiento de su lecho, dejando áreas depresionarias ubicadas preferentemente próximas a los cerros. Las altas pendientes de los cerros y el continuo desprendimiento de sus materiales, ha originado grandes formaciones de piedemontes, a ambos lados del valle. a cuenca del río Aconcagua posee unidades taxonómicas características de la V Región de Valparaíso y corresponden básicamente a suelos anfisholes, inceptisoles y Molisoles (Cade-idepe, 2004).

### **3.2.3 Clima**

Los climas que se distinguen en la cuenca del Río Aconcagua corresponden a los climas: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes (Cade-Idepe 2004).

- Clima Templado Mediterráneo con estación seca prolongada: Su característica principal es la presencia de una estación seca prolongada y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que llegan a cero grados. Los Andes registra una temperatura media anual de 15,2° C pero los contrastes térmicos son fuertes. En verano las máximas alcanzan valores superiores a 27° C durante el día. En la estación Vilcuya se tienen valores medios de precipitación de 467 mm/año y temperatura de 14,1 ° C.
- Clima Frío de Altura: Se localiza en la Cordillera de los Andes por sobre los 3.000 metros de altura. Las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas, caracterizan este tipo climático, permitiendo la acumulación de nieve y campos de hielo de tipo permanentes en cumbres y quebradas de la alta Cordillera.

### 3.2.4 Hidrogeología

Solo el sector bajo de la cuenca, correspondiente al punto de salida, presenta presencia de acuífero, correspondiente al del sector de San Felipe - Los Andes, con una recarga asociada de 11,78 m<sup>3</sup>/s (DGA, 2011).

### 3.3 Información hidrometeorológica disponible

#### 3.3.1 Información fluviométrica

El punto de salida de la cuenca se encuentra en el río Aconcagua, unos 8 km aguas arriba de la ciudad de Los Andes, la tabla 3.2 muestra su ubicación, código e inicio de medición. Es muy importante, porque es representativa del caudal del río a la entrada al valle central. En la figura 3.4 se puede apreciar que esta estación presenta un régimen netamente nival. Los mayores caudales se observan entre noviembre y febrero, producto de deshielos mientras que el período de menores caudales ocurre entre mayo y agosto, la tabla 3.3 hace referencia a los valores de caudal mes a mes asociados a una determinada probabilidad de excedencia.

**Tabla 3.2** Estación fluviométrica Río Aconcagua en Chacabuquito

Cuenca	Estación	Código BNA	Ubicación [m]			Inicio
			Norte	Este	Altitud	
Aconcagua	Río Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7	6364602	358735	950	May-66

**Tabla 3.3** Curva Variación Estacional, caudales medios mensuales [m<sup>3</sup>/s] Río Aconcagua en Chacabuquito (Cade-Idepe, 2004)

Pexc (%)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
5	25,3	22,0	24,5	28,2	28,7	41,3	62,2	110,1	174,5	154,3	81,8	47,3
10	22,4	19,4	21,3	23,9	24,9	34,6	52,3	95,6	141,3	114,4	65,2	38,4
20	19,4	16,7	18,0	19,6	20,8	27,9	42,4	79,7	109,1	81,3	50,4	30,7
50	14,9	12,5	13,0	13,4	14,7	18,5	28,4	54,2	65,9	46,2	33,0	21,6
85	10,8	8,9	8,6	8,4	9,3	11,1	17,4	31,2	34,4	28,3	22,5	16,2
95	9,0	7,2	6,6	6,4	6,8	8,3	13,0	21,5	22,8	23,6	19,2	14,6

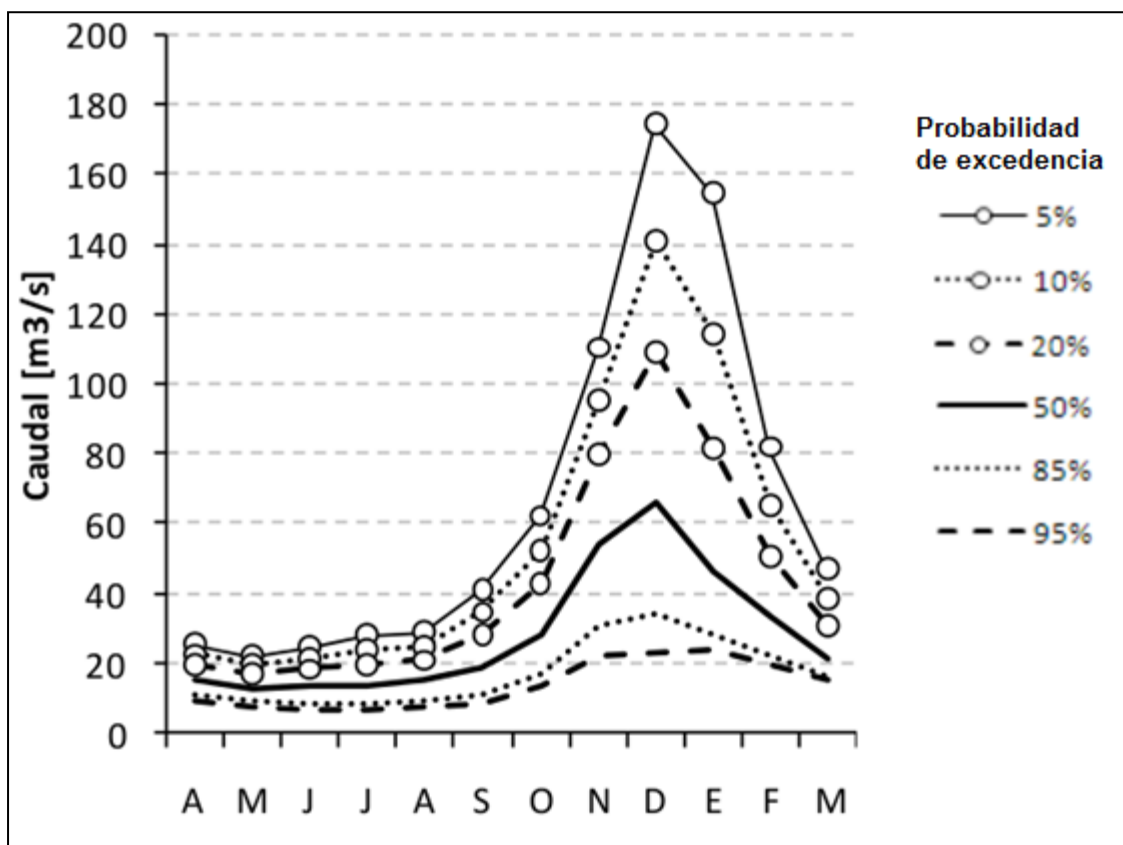


Figura 3.4 Curva de Variación Estacional Aconcagua en Chacabuquito (Cade-Idepe, 2004)

### 3.3.2 Información Pluviométrica

En lo que respecta a la información de precipitaciones disponibles, destaca la presencia de las estaciones DGA Portillo y Vilcuya, a partir de las cuales se realiza un proceso de extrapolación del gradiente observado de precipitación al total de la cuenca con el objetivo de conocer valores para cada una de las celdas.

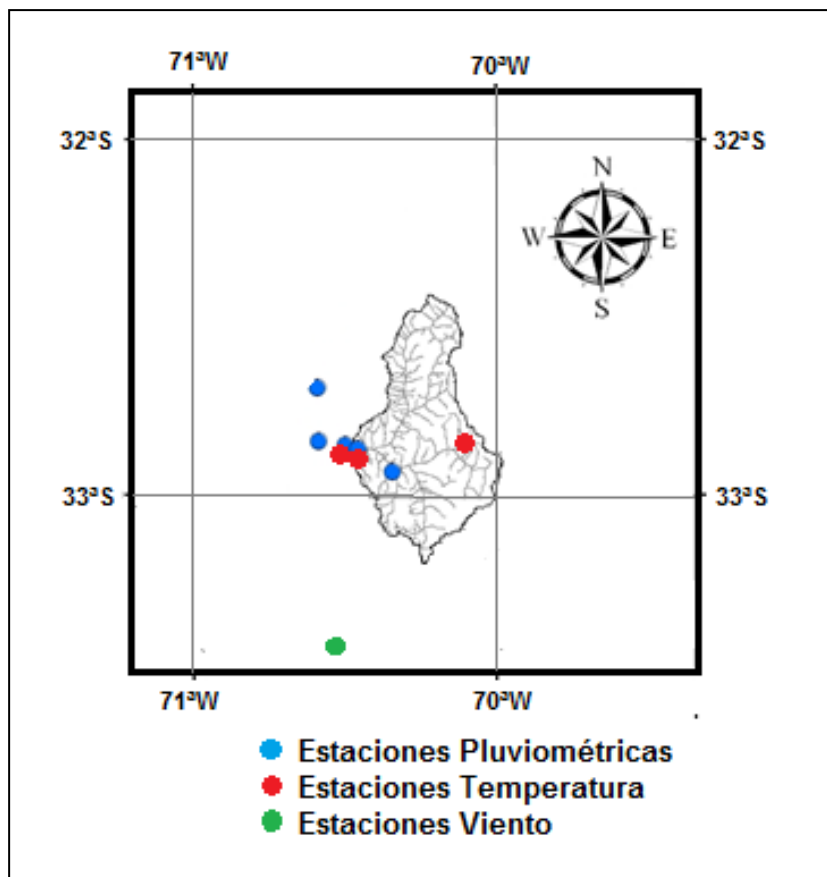
### 3.3.3 Información de Temperaturas

En lo que respecta a la temperatura, y con el fin de cubrir todas las celdas de la cuenca, se utilizan valores satelitales de temperatura del suelo. Sin embargo se necesita la temperatura del aire, por lo cual se adopta una correlación suelo-aire en las estaciones disponibles en la cuenca (Universidad de Chile, 2011).

### 3.3.4 Información de viento

En el caso del viento se cuenta solo con una estación disponible, por lo que se debe realizar una simplificación y considerar que esta estación es completamente representativa de la cuenca.

La figura 3.5 muestra la distribución geográfica y la tabla 3.4 el nombre de las estaciones utilizadas para el trabajo pluviométrico, de temperaturas y de viento, en el contexto de la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito. El detalle del trabajo mencionado para cada una de estas forzantes se encuentra detallado en el capítulo 4 de la presente memoria.



**Figura 3.5** Posición geográfica estaciones a utilizar

**Tabla 3.4** Estaciones a utilizar

Tipo de estación	Nombre	Ubicación [m]		
		Norte	Este	Altitud
Pluviométricas	Río Aconcagua en Chacabucuito	6364602	358735	950
	Vilcuya	6362541	362778	1100
	San Felipe	6369605	340826	672
	Riecillos	6355295	373789	1290
	Portillo	6366637	395487	3000
Temperatura	Río Aconcagua en Chacabucuito	6364602	358735	950
	Vilcuya	6362541	362778	1100
	Portillo	6366637	395487	3000
Viento	Quinta Normal	6299780	343818	520

## 4 Información requerida para la modelación

### 4.1 Parámetros generales VIC

El programa VIC exige una serie de archivos con parámetros de la cuenca de estudio para poder funcionar, estos tienen relación con el suelo, la vegetación, bandas de elevación y un archivo global de parámetros que relaciona los anteriores.

#### 4.1.1 Archivos de vegetación

La caracterización de la cobertura de superficie se basa en la clasificación de vegetación global de la Universidad de Maryland (Hansen et al. 2000), la cual tiene una resolución espacial de 1 km y un total de 14 coberturas. A partir de estos datos globales se obtienen los tipos de cobertura de tierra presentes en cada celda de la cuadrícula del modelo y la proporción de la celda ocupada por cada una (Maurer et al. 2001). La característica principal de la cobertura requerida por VIC es el Leaf Area Index (LAI), la cual debe describirse mes a mes para cada tipo de cobertura, sin embargo no cambió de año a año. Los valores para cada tipo de vegetación se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Parámetros para cada tipo de vegetación

	Tipo vegetación	Albedo	Rmin [s/m]	LAI	Rugosidad [m]	Desplazamiento [m]
1	Bosque de coníferas	0.12	250	3.4-4.4	1.476	8.04
2	Bosque conífero de hoja ancha	0.12	250	3.4-4.4	1.476	8.04
3	Bosque decíduo	0.18	150	1.5-5	1.23	6.7
4	Bosque decíduo de hoja ancha	0.18	150	1.5-5	1.23	6.7
5	Bosque mixto	0.18	200	1.5-5	1.23	6.7
6	Arboleda	0.18	200	1.5-5	1.23	6.7
7	Bosques pastizales	0.19	125	2.2-3.9	0.495	1
8	Matorrales cerrados	0.19	135	2.2-3.9	0.495	1
9	Matorrales abiertos	0.19	135	2.2-3.9	0.495	1
10	Pastizales	0.2	120	2.2-3.9	0.074	0.402
11	Tierra de cultivo	0.1	120	0.02-5	0.006	1.005

El archivo de parámetros de vegetación describe la composición de cada celda y usa la misma grilla existente para la separación geográfica, este archivo une las características de cada cobertura con una librería de vegetación.

Los parámetros de vegetación requeridos y la librería de vegetación para VIC se muestran en las tablas 4.2 y 4.3 respectivamente.



**Tabla 4.2** Parámetros de vegetación

<b>Nombre variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>
vegetat_type_num	N/A	Número de tipos de vegetación en una celda de la cuadrícula
veg_class	N/A	Número de identificación de la clase de vegetación (índice de referencia a la biblioteca de la vegetación)
Cv	fracción	Fracción de la celda de la cuadrícula cubierta por el tipo de vegetación
root_depth	m	Raíz de espesor de la zona (suma de las profundidades es la profundidad total de penetración de las raíces)
root_fract	fracción	Fracción de la raíz en la zona de la raíz actual.
sigma_slope	N/A	La desviación estándar de la pendiente del terreno para cada clase de vegetación
lag_one	N/A	Gradiente de autocorrelación en la pendiente del terreno
fetch	m	Promedio fetch para cada clase de vegetación

**Tabla 4.3** Librería de vegetación

<b>Nombre de la variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Numero de valores</b>	<b>Descripción</b>
veg_class	N/A	1	número de identificación de la clase de vegetación (índice de referencia para la tabla de la biblioteca)
overstory	N/A	1	Bandera para indicar si el tipo de vegetación actual tiene un dosel (TRUE para la masa arbórea presente [por ejemplo, los árboles], no para FALSOS dosel presente [por ejemplo: pasto])
rarc	s/m	1	Resistencia a la arquitectura del tipo de vegetación (~ 2 s / m)
rmin	s/m	1	La resistencia mínima de estomas del tipo de vegetación (~ 100 s / m)
LAI		12	Índice del área de follaje en tipo de vegetación
albedo	fracción	12	Albedo de onda corta para el tipo de vegetación
rough	M	12	Longitud de rugosidad en vegetación
displacement	M	12	Altura de desplazamiento en vegetación

<b>Nombre de la variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Numero de valores</b>	<b>Descripción</b>
wind_h	M	1	Altura a la que se mide la velocidad del viento.
RGL	W/m <sup>2</sup>	1	La radiación entrante de onda corta mínima a la que habrá de transpiración. Para los árboles se trata de 30 W / m <sup>2</sup> , para los cultivos de alrededor de 100 W / m <sup>2</sup> .
rad_atten	fracción	1	Factor de atenuación de la radiación. Normalmente en 0,5, aunque puede ser necesario ajustar para altas latitudes.
wind_atten	fracción	1	Atenuación de la velocidad a través del arbusto. El valor por defecto ha sido de 0,5.
trunk_ratio	fracción	1	Relación entre la altura total del árbol que es el tronco (no sucursales). El valor por defecto ha sido de 0,2.
comment	N/A	1	Comentario de bloque para el tipo de vegetación. Modelo salta final de la línea así que los espacios son entradas válidas.

En el caso de la Cuenca de Aconcagua en Chacabucuito, y basado en información satelital (Figura 4.1), se determina que la cobertura de vegetación es nula.



**Figura 4.1 Vegetación cuenca Aconcagua en Chacabucuito**

### 4.1.2 Bandas de elevación

Este archivo contiene la información necesaria para definir las propiedades de cada banda de elevación utilizados por el modelo de la nieve. Las Bandas de elevación de la nieve se utilizan para mejorar el desempeño del modelo en el cambio de la topografía, las regiones montañosas, especialmente donde los efectos de la elevación en la acumulación de nieve y la ablación, podrían perderse en una celda de la cuadrícula grande. La tabla 4.4 muestras los parámetros utilizados.

**Tabla 4.4** Parámetros de elevación de bandas

Nombre de variable	Unidad	Número de valores	Descripción
Cellnum	N/A	1	Número de células (debe coincidir con los números asignados en el archivo de suelo de parámetros)
AreaFract	fracción	SNOW_BAND	Fracción de celda cubierta por cada banda de elevación. Suma de las fracciones debe ser igual a 1.
elevation	m	SNOW_BAND	La media (o mediana) la elevación de la banda de elevación. Esto se utiliza para calcular el cambio en la temperatura del aire de la elevación rejilla media celda.
Pfactor	fracción	SNOW_BAND	Fracción de la precipitación de células que cae en cada banda de elevación. El total debe ser igual a 1. Hacer caso omiso de los efectos de la elevación de las precipitaciones, establecer estas fracciones iguales a las fracciones de la zona.

Para la Cuenca de estudio, y en función de que el tamaño de las celdas es de 5 kilómetros, se define que cada celda posee solo una banda de elevación.

### 4.1.3 Parámetros de suelo

El archivo de parámetros de suelo requerido por VIC describe las propiedades de los suelos únicos para cada celda de la cuadrícula en el dominio del modelo. También es el archivo principal que identifica cuales celdas de la cuadrícula se simulará, y cuáles son sus latitudes y longitudes.

La textura de suelos fue obtenida desde FAO (1998). Hay una serie de parámetros que son únicos de cada suelo sin importar el lugar del mundo donde se trabaje, estos corresponden a la porosidad, potencial saturado de suelo, conductividad hidráulica saturada y el exponente B para suelos sin saturar.

Otra categoría de parámetros se calibran en función de las propiedades hidrológicas de la zona, estos incluyen la profundidad de la capa de suelo, el exponente de la curva de infiltración y los parámetros  $D_m$ ,  $D_s$  y  $W_s$  del esquema de flujos. Los parámetros requeridos se muestran en la tabla 4.5.

**Tabla 4.5** Parámetros de suelo

Nombre de la Variable	Unidad	Número de valores	Descripción
	N/A	1	1 = corre la celda, 0 = no corre
gridcel	N/A	1	Numero de la celda
lat	grados	1	Latitud de la celda
lon	grados	1	Longitud de la celda
infiltr	N/A	1	Parámetro de la curva de infiltración ( $b_i$ )
$D_s$	fracción	1	Fracción de $D_{smax}$ donde el flujo base no lineal comienza
$D_{smax}$	mm/día	1	Velocidad máxima del flujo base
$W_s$	fracción	1	Fracción de la humedad del suelo máximo en el que el flujo base no lineal se produce
c	N/A	1	Exponente del flujo de base utilizado en la curva, que suele fijarse a 2
expt	N/A	Nlayer	Parámetro que describe la variación de $K_{sat}$ con la humedad del suelo
$K_{sat}$	mm/día	Nlayer	La conductividad saturada hidrológico
phi_s	mm/mm	Nlayer	Humedad del suelo parámetro de difusión
init_moist	mm	Nlayer	Capa inicial contenido de humedad
elev	m	1	Elevación media de celda de la cuadrícula
depth	m	Nlayer	El espesor de cada capa de la humedad del suelo
avg_T	C	1	Temperatura del suelo medio, que se utiliza como el límite inferior para las soluciones del suelo de flujo de calor
dp	m	1	La profundidad del suelo de amortiguación térmica (profundidad a la que la temperatura del suelo se mantiene constante durante todo el año, ~ 4 m)
bubble	cm	Nlayer	Presión de burbujeo del suelo
quartz	fracción	Nlayer	Contenido de cuarzo del suelo
bulk_density	kg/m <sup>3</sup>	Nlayer	La densidad aparente de la capa de suelo
soil_density	kg/m <sup>3</sup>	Nlayer	Densidad de las partículas del suelo, normalmente 2.685 kg/m <sup>3</sup>
off_gmt	horas	1	La zona horaria de GMT
$W_{cr\_FRACT}$	fracción	Nlayer	Fraccional del suelo contenido de humedad en el punto crítico (~ 70% de la capacidad de campo) (fracción de humedad como máximo)
$W_{pwp\_FRACT}$	fracción	Nlayer	Fraccional del suelo contenido de humedad en el punto de marchitez permanente(fracción de humedad como máximo)

Nombre de la Variable	Unidad	Número de valores	Descripción
<u>rough</u>	m	1	Rugosidad de la superficie de suelo desnudo
<u>snow_rough</u>	m	1	Rugosidad de la superficie de la capa de nieve
<u>annual_prec</u>	mm	1	La precipitación media anual.
<u>resid_moist</u>	fracción	Nlayer	La humedad del suelo capa residual de humedad
fs_active	1 ó 0	1	Si se establece en 1, el algoritmo luego se congelan el suelo se activa para la celda de la cuadrícula. El valor 0 indica que los suelos congelados que no se calculan, incluso si las temperaturas del suelo cae por debajo de 0 ° C.

Luego, cada uno de estos parámetros debe llenarse para cada tipo de suelo existente en la zona de estudio. La tabla 4.6 muestra las categorías de suelo posibles según FAO, y los valores que no se calibran asociados a ellas.

**Tabla 4.6** Texturas de suelos

Clase	Textura del suelo	$\Theta_s$ [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\Psi_s$ [m]	$K_s$ [mm/día]	Densidad aparente [kg/m <sup>3</sup> ]
1	Arena	0.445	0.070	92.45	1490
2	Arenoso franco	0.434	0.040	1218.24	1520
3	Franco arenoso	0.415	0.141	451.87	1570
4	Franco limoso	0.471	0.759	242.78	1420
5	Limo	0.523	0.759	242.78	1280
6	Franco	0.445	0.355	292.03	1490
7	Franco arcillo arenoso	0.404	0.135	384.48	1600
8	Franco arcillo limoso	0.486	0.617	176.26	1380
9	Franco arcilloso	0.467	0.263	211.68	1430
10	Arcillo arenoso	0.415	0.100	623.81	1570
11	Arcillo limoso	0.497	0.324	115.78	1350
12	Arcilla	0.482	0.468	84.15	1390

Con esta información disponible se procede al cálculo del tipo de suelo para la cuenca de Aconcagua en Chacabuco. Para esto se utiliza el software de tipo GIS GRASS, en el cual se trabaja con la información mundial entregada por la FAO (Figura 4.2), para luego mediante un trabajo de mascarar mostrar solo la zona de interés y ver con claridad los tipos de suelos encontrados, este detalle se muestra en la figura 4.3.

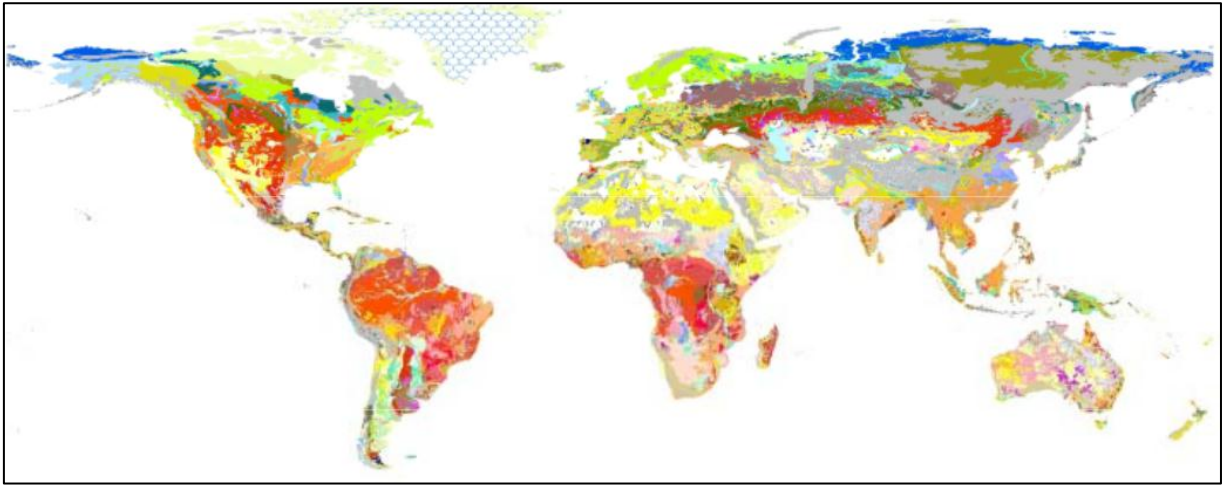


Figura 4.2 Mapa mundial texturas de suelo (FAO)

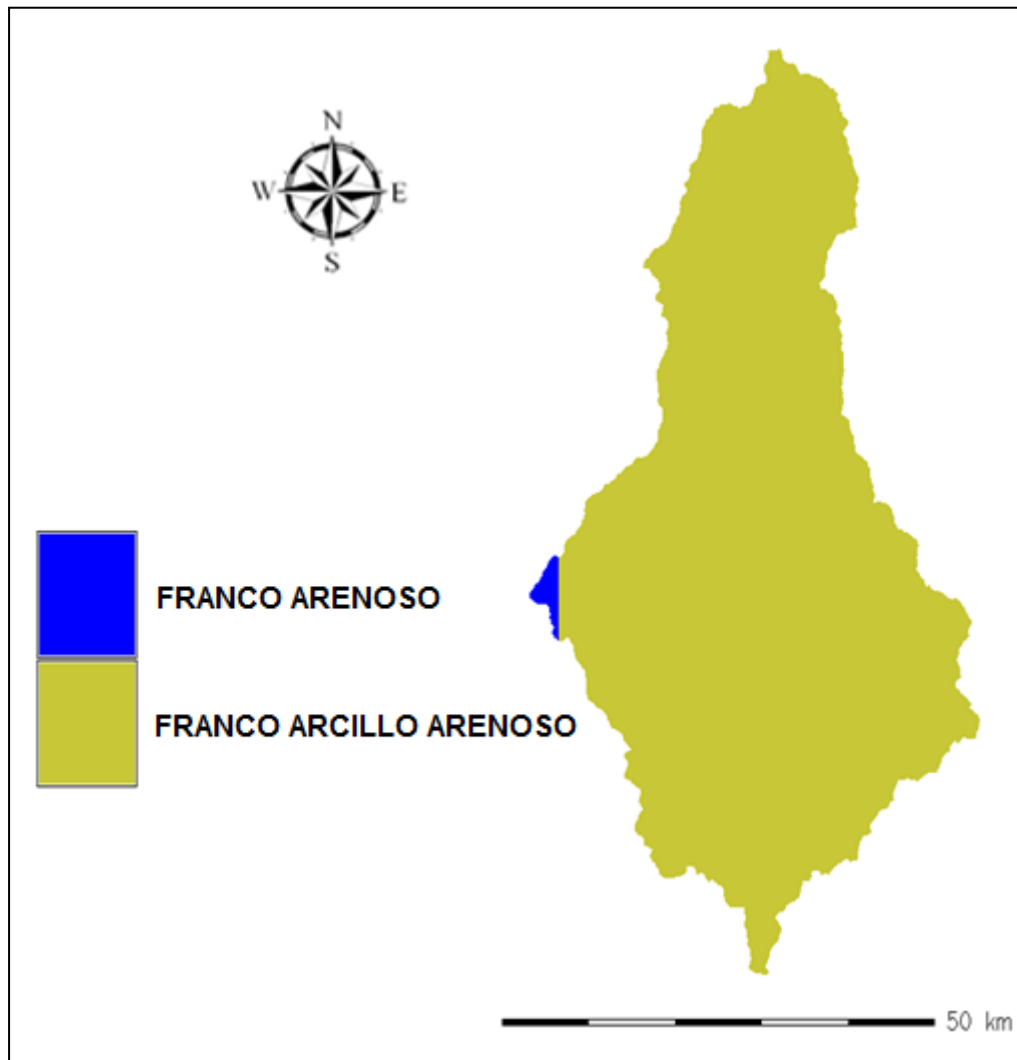


Figura 4.3 Texturas de suelo en Aconcagua en Chacabuquito

De lo anterior se desprende que la cuenca de Aconcagua en Chacabucito presenta sobre un 95% una textura de suelo correspondiente a Limo arenoso arcilloso, y en un pequeño porcentaje en el punto de salida Limo arenoso. Estos suelos corresponden a los 7 y 3 de la figura 4.2 respectivamente, por lo que son estos valores los que se utilizaron para rellenar el archivo de entrada, dependiendo de la celda.

#### 4.1.4 Parámetros globales

El Archivo de parámetros globales tiene dos grandes propósitos:

- Referencia a VIC los nombres, ubicaciones y formatos de los archivos de entrada y de salida.
- Define alguno de los parámetros globales de la simulación, lo que equivale a las opciones de “run-time”.

Las opciones que definen la simulación se muestran en la tabla 4.7, destacando el paso de tiempo y la elección de correr VIC como balance hídrico o de energía.

**Tabla 4.7** parámetros globales

Nombre	Tipo	Unidad	Descripción
NLayer	entero	N/A	Número de capas de humedad utilizados por el modelo
NODES	entero	N/A	Número de nodos de soluciones térmicas en la columna de suelo
TIME_STEP	entero	horas	Tiempo de simulación paso largo (hay que dividir equitativamente 24). NOTA:TIME_STEP debe ser <24 para FULL_ENERGY = TRUE o FROZEN_SOIL = TRUE.
SNOW_STEP	entero	horas	Duración del paso de tiempo utilizado para resolver el modelo de la nieve (hay que dividir 24 por igual, y si TIME_STEP <24, SNOW_STEP debe ser =TIME_STEP)
STARTYEAR	entero	año	Año de comienzo simulación del modelo
STARTMONTH	entero	mes	Mes de comienzo simulación del modelo
STARTDAY	entero	día	Día de comienzo simulación del modelo
STARTHOUR	entero	hora	Hora de comienzo simulación del modelo
ENDYEAR	entero	año	Año de término simulación del modelo
ENDMONTH	entero	mes	Mes de término simulación del modelo
ENDDAY	entero	día	Día de término simulación del modelo

Nombre	Tipo	Unidad	Descripción
FULL_ENERGY	string	TRUE o FALSE	Opción para la temperatura de la superficie de la tierra (el suelo o la superficie de la capa de nieve) TRUE = itera la temperatura que equilibra el presupuesto de energía en la superficie FALSE = ajustar la temperatura de superficie igual a la temperatura del aire
FROZEN_SOIL	string	TRUE o FALSE	Opción para manejar el cambio de fase de agua / hielo en los suelos congelados  TRUE= cuenta para el cambio de fase de agua / hielo (incluyendo el calor latente).  FALSE= la humedad del suelo siempre permanece en estado líquido, aun cuando esté por debajo de 0° C.

## 4.2 Variables forzantes

Las variables forzantes requeridas por VIC tienen que ver con las variantes meteorológicas del lugar. Es así como se debe detallar la precipitación, temperatura mínima y máxima y velocidad del viento para cada una de las celdas para el periodo previo definido al que se busca pronosticar. Las técnicas utilizadas para detallar estos valores en cada una de las celdas son distintas para cada variable forzante, en función de la baja cantidad de estaciones meteorológicas en la zona. Al ser el tamaño de la celda de 5 km, la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito presenta un total de 85 celdas para su modelación. El periodo utilizado para la calibración corresponde desde el 01 de abril del 2006 al 31 de marzo del 2010.

Se debe entonces, para el funcionamiento de VIC, generar tantos archivos de entrada como celdas tiene la cuenca, y en cada uno de estos archivos se tienen cuatro columnas, que detallan la precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima y velocidad del viento respectivamente, esto para cada paso de tiempo definido. Esto se realiza para el periodo previo al de pronóstico, es decir, se entregan los valores conocidos hasta un día antes del pronóstico, en este caso fueron más de 4 años de valores, con lo cual VIC genera internamente, en base a lo entregado, valores meteorológicos para el periodo de pronóstico. Además de las variables ya mencionadas VIC también genera sus propios de valores de radiación y albedo.

Para cada una de las variables meteorológicas se procede a realizar tres metodologías diferentes, esto debido a la calidad y/o cantidad de información de cada una de ellas. Es así como para la precipitación se utiliza como estación base la de Aconcagua en Chacabucuito y en relación a esta se calculan gradientes topográficos, con los cuales se procede a otorgar el valor a cada celda. Es importante notar que los valores de precipitación se calculan de manera diaria, sin embargo el balance energético de VIC nos exige un paso de tiempo de 8 horas, por lo que se divide este valor en tres, sin



otorgar ningún peso mayor a alguna franja horaria. Esto trae las complicaciones típicas de trabajar con un gradiente de precipitaciones, como lo son la homogeneización de este, es decir, que se entrega un valor único de este, sin considerar casos atípicos en el crecimiento de altura, lo que puede generar que algunas celdas no se guíen por el mismo patrón. Por otra parte el cálculo del gradiente utiliza como estación más alta la de Portillo, por lo que desde ese punto hacia arriba todo es extrapolación, y mientras más alto en altitud el gradiente no es necesariamente el mismo.

En el caso de la temperatura del aire se realizó una correlación con la temperatura del suelo mediante imágenes satelitales, donde se lograron correlaciones de alta precisión, sin embargo se presentan problemas para los valores extremos, lo cual puede generar ciertos errores para el módulo de nieves del modelo VIC. Además la mayor incertidumbre entregada al programa tiene que ver con que este pide una temperatura mínima y una máxima para cada paso de tiempo, de 8 horas en este caso, sin embargo por la falta de valores de entrada solo se puede trabajar con una máxima y mínima diaria, por lo que estas son otorgadas a las distintas franjas horarias (temperatura mínima en la madrugada y máxima en la tarde) con lo cual para cada paso de tiempo se copia el valor previamente asignado como mínimo y máximo en ese instante.

Finalmente para el viento solo se cuenta con una estación con los suficientes valores como para poder lograr resultados aceptables, en esta se generan promedios mensuales, los cuales son expandidos a las celdas, es decir para cada mes, todas las celdas poseen el mismo valor de velocidad del viento, lo cual sin duda genera un error en el pronóstico realizado, ya que no considera las diferencias topográficas entre las celdas analizadas.

#### 4.2.1 Precipitación

Los valores de precipitación para la cuenca se desprenden del proyecto DGA antes descrito, en el cual utilizando las estaciones disponibles en la zona de estudio y mediante técnicas de correlación con la topografía del lugar, se logra determinar un valor para cada celda.

A partir de la información registrada en las estaciones pertenecientes a la zona de estudio, tabla 4.8, se genera un gradiente anual de precipitación con la altura para cada una de las cuencas, el que posteriormente es distribuido de forma diaria utilizando una estación base (EB).

**Tabla 4.8** Estaciones utilizadas para la construcción del gradiente de precipitación

Cuenca	Estaciones
Río Aconcagua en Chacabuquito	San Felipe, Río Aconcagua en Chacabuquito, Vilcuya (EB), Riecillos, Portillo.

El uso de la estación Portillo (snow pillow) tiene gran relevancia puesto que aporta con información de precipitaciones en altura. Su utilización considera los siguientes supuestos:

- La máxima acumulación de nieve registrada en la estación (*est*), expresada como equivalente en agua, es representativa de la precipitación caída entre los meses de mayo y agosto, a excepción del año 2005 en donde las lluvias de septiembre son relevantes, produciéndose la máxima acumulación en ese mes.

$$Pp_{may-ago_{est}} = \text{Máxima Acumulación}_{est} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

- La razón entre la precipitación caída en la estación (*est*) entre los meses de mayo y agosto, y la total anual, es la misma que la que existe en promedio para el resto de las estaciones consideradas en la construcción del gradiente.

$$\frac{1}{n} \sum_i^n \frac{Pp_{may-ago_i}}{Pp_{anual_i}} = \frac{Pp_{may-ago_{est}}}{Pp_{anual_{est}}} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde  $Pp_{may-ago_i}$  corresponde a la precipitación caída entre mayo y agosto en la estación *i* utilizada para la construcción del gradiente, y  $Pp_{anual_i}$  corresponde a la precipitación anual registrada en ésta.

Mediante este procedimiento es posible determinar la precipitación total anual en la estación Portillo e integrarla en el cálculo del gradiente de precipitación. El gradiente obtenido en la cuenca de interés del presente estudio, para los años en que se corre el modelo se muestra en la tabla 4.9, donde *z* corresponde a la elevación de la celda y  $Z_{EB}$  a la cota de la estación base

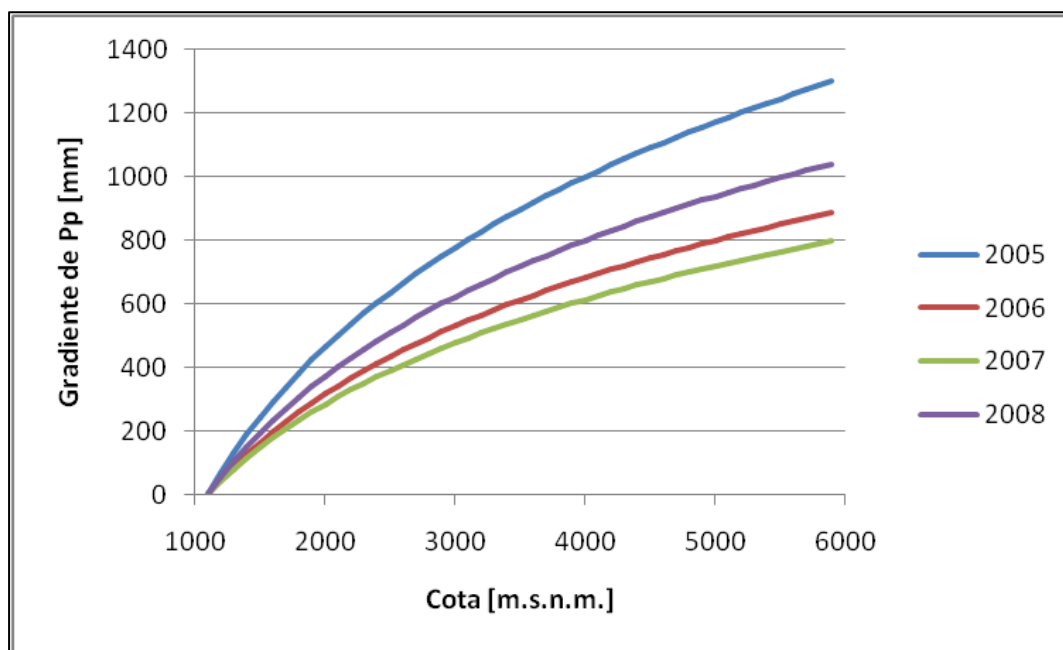
**Tabla 4.9** Gradientes anuales observados en la cuenca de estudio

Cuenca	Gradiente	2005	2006	2007	2008
Río Aconcagua en Chacabuquito	Logarítmico [mm]	$772.7 \cdot \ln(z/z_{EB})$	$527.5 \cdot \ln(z/z_{EB})$	$474.3 \cdot \ln(z/z_{EB})$	$618.5 \cdot \ln(z/z_{EB})$

La precipitación diaria en cada una de las celdas se determina aplicando la siguiente ecuación (gradiente logarítmico):

$$Pp_{i,j} = \frac{Pp_{EB,j}}{Pp_{EB,anual}} \cdot m \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde  $Pp_{i,j}$  corresponde a la precipitación en la celda *i* para el día *j*,  $Pp_{EB,j}$  a la precipitación caída en la estación base para el día *j*,  $Pp_{EB,anual}$  a la precipitación anual caída en la estación base y *m* al gradiente anual de precipitación que se muestra en la tabla 4.9. La forma de los gradientes es la que se entrega en la figura 4.4, donde se observa que la diferencia entre las curvas tiene relación con lo húmedo o seco del año asociado, siendo así la curva más alta la del año 2005, que es el año más húmedo de los calculados, y la curva más baja la del año 2007, el año más seco.



**Figura 4.4 Gradiente de precipitaciones respecto a estación Vilcuya, cuenca de Aconcagua en Chacabuco**

#### 4.2.2 Temperatura

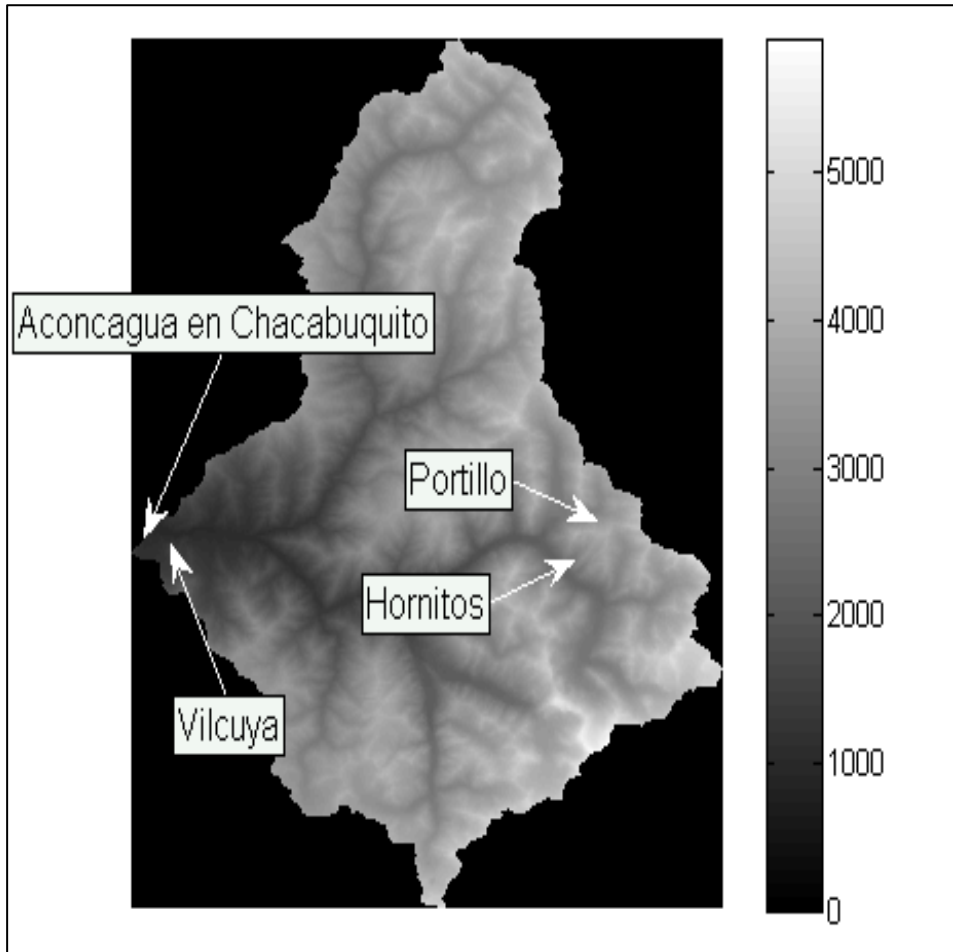
Se procede a calcular la temperatura del aire utilizando imágenes satelitales e información de estaciones meteorológicas. Primero se rellenaron las imágenes satelitales a través de la metodología propuesta y descrita en la investigación DGA (detallada más adelante). Una vez rellenas, se procede a correlacionar el valor de temperatura del suelo dado por la imagen satelital en la celda de ubicación de la estación junto con el valor de la temperatura del aire que mide la estación meteorológica. Las correlaciones obtenidas son mayores a  $r^2 > 0,7$  en el periodo de calibración para las 3 estaciones meteorológicas. Dado lo anterior, se procede a extrapolar esta información al resto de las celdas de la cuenca, obteniéndose grillas de temperatura del aire para toda la cuenca.

El trabajo de percepción remota tiene que ver con las imágenes satelitales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) las cuales a través de 36 bandas que captan distintas longitudes de onda, proveen una manera de cuantificar las características de la superficie del terreno como lo es: el tipo de cubierta y su extensión, cobertura nival, temperatura superficial, cobertura vegetal y ocurrencia de incendios forestales. En el caso de la temperatura de la superficie del terreno, ésta viene procesada por medio del algoritmo generalizado Split-Window (verificado por Wang, 2006) el cual utiliza las bandas emisivas 31 y 32, junto a otras imágenes MODIS para obtener la información. Los productos MODIS de temperatura se descargan gratuitamente con el nombre de LAND SURFACE TEMPERATURE (LST) MODIS/Terra y MODIS/Aqua, con resolución espacial máxima de  $1 \text{ km}^2$  y temporal diaria tanto para el día como la noche (MOD11A1 y MYD11A1 versión 004 y 041).

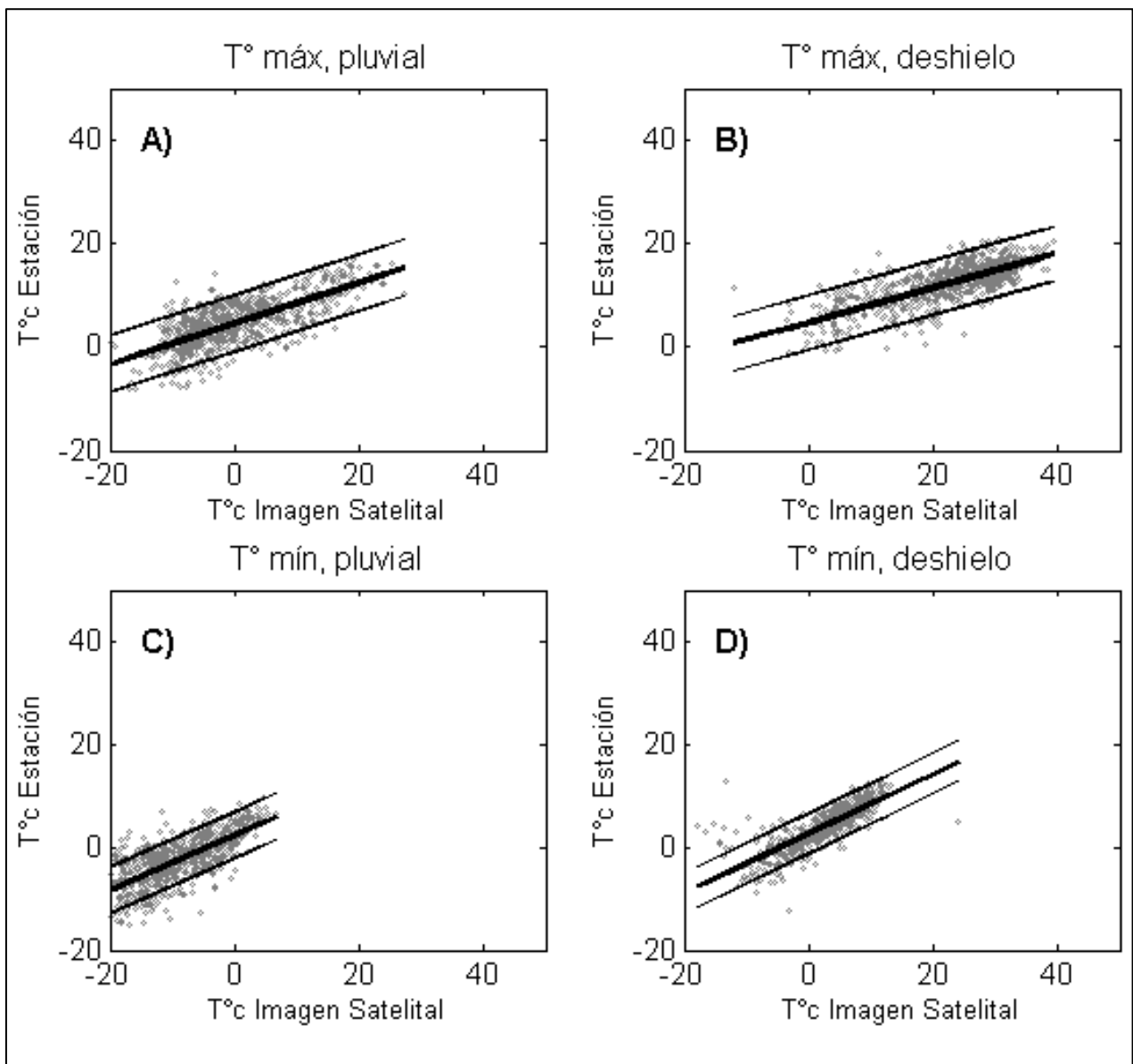
Es importante mencionar que no siempre es posible obtener este valor de la celda. Los principales problemas se explican como errores en la medición del dato (temperatura del suelo que escape de un rango razonable) e interferencia de nubes que no permite obtener la información. Para lo anterior, se desarrolló un algoritmo (Universidad de Chile, 2011) que permite rellenar la información faltante en las imágenes MODIS para cualquier cuenca en general y se verifican con una cuenca en particular. Los pasos a seguir se presentan a continuación:

- En primer lugar se selecciona la mayor temperatura de la imagen de día entre las imágenes de los satélites MODIS/Terra y MODIS/Aqua, y la menor temperatura de la imagen de noche.
- Existe un gradiente lineal entre la altura y la temperatura de terreno. Los valores de temperatura del terreno que rodean la celda o el grupo de celdas sin información se utilizan, al igual que su información de elevación obtenida a través de un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés), para realizar un ajuste lineal entre la temperatura y cota de la celda. Este algoritmo se realiza cuando existe a lo más un 20% de información faltante en la cuenca.
- Por último, las imágenes que no pueden ser completadas por el método anterior, se rellenan utilizando el promedio ponderado en el tiempo de las imágenes completas o rellenas más próximas, es decir, la imagen completa más cercana en un tiempo anterior y la más cercana en un tiempo posterior se promedian ponderándose según el desfase temporal existente con la imagen que quiere rellenarse. Es así, que se cuenta con la información completa de la temperatura de la superficie del terreno para cualquier cuenca en particular.

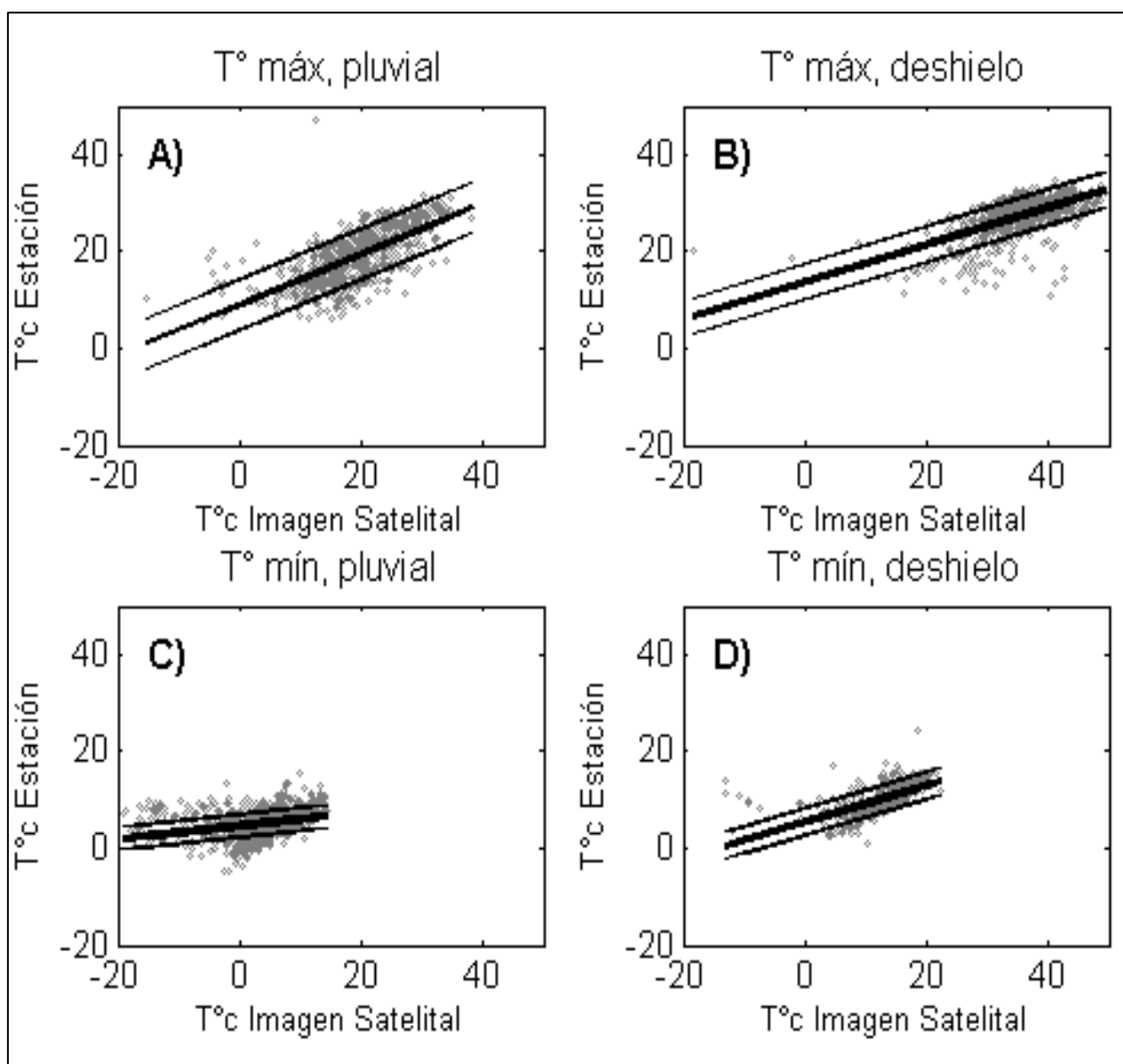
Para obtener la temperatura del aire, se utiliza la información meteorológica de las estaciones presentes en la cuenca y se correlacionan con la información de la celda de ubicación de la estación y que ha sido rellena por la metodología anterior. Para las estaciones ubicadas dentro de la cuenca definida por la estación meteorológica y fluviométrica Aconcagua en Chacabuquito de la cordillera de los Andes de Chile, en particular en las estaciones Portillo, Aconcagua en Chacabuquito y Vilcuya (la ubicación de estas estaciones de muestra en la figura 4.5) se obtienen los resultados presentados en Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8 respectivamente, las que muestran la temperatura entregada por imagen MODIS y la temperatura del aire medida en cada estación. En ellas se define un periodo de calibración de 4 años hidrológicos comprendido entre el 1 de abril de 2005 y el 31 de marzo del 2009, además se divide cada año en periodo Pluvial (1 de abril hasta 30 de marzo) y periodo de Deshielo (1 de octubre hasta 31 de marzo).



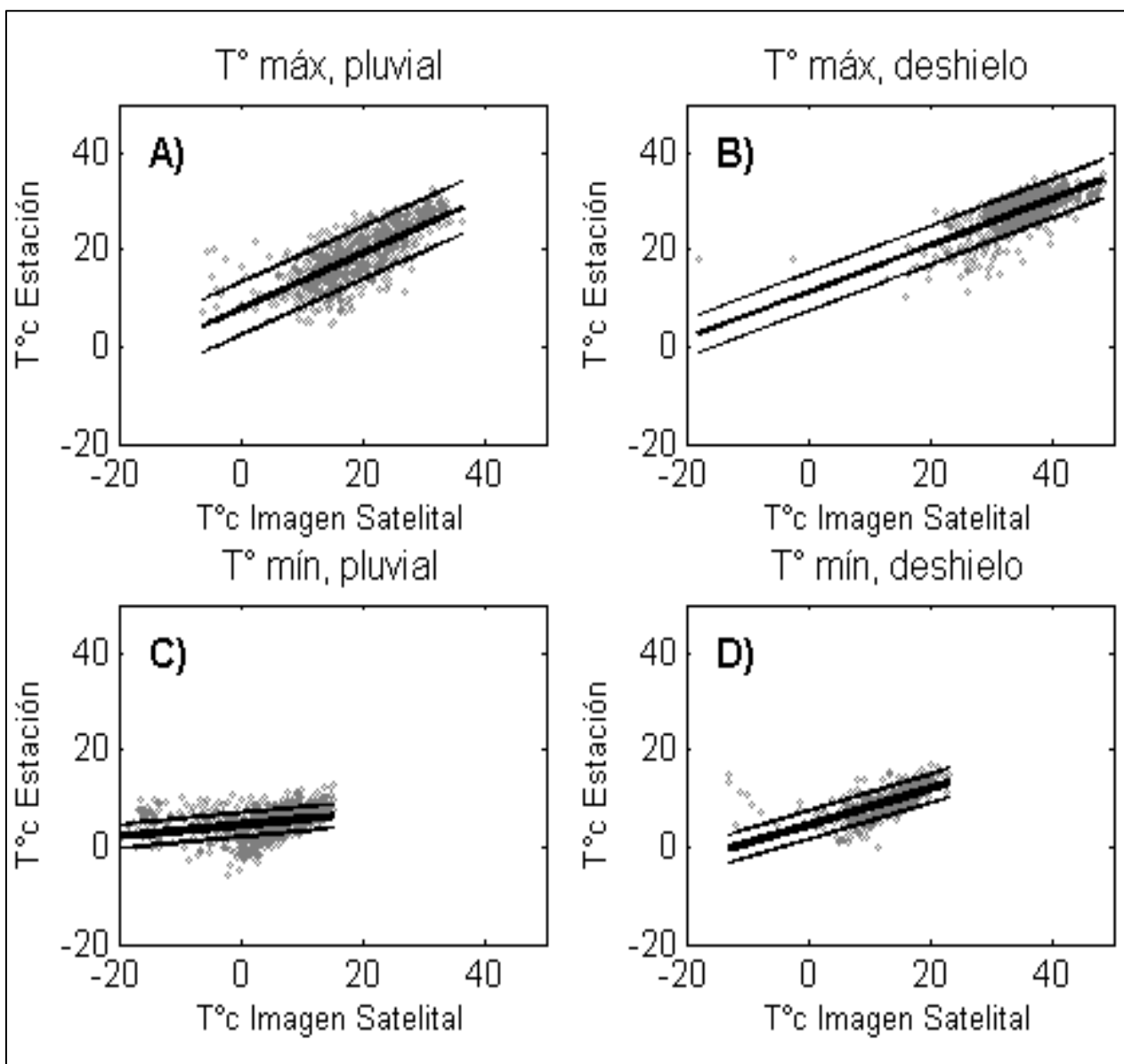
**Figura 4.5 Mapa de elevación digital (m.s.n.m.) de la cuenca Aconcagua en Chacabuco con la ubicación de las estaciones utilizadas**



**Figura 4.6 Regresión para Portillo: A) temperatura máxima diaria en el periodo pluvial. B) temperatura máxima diaria en el periodo deshielo. C) temperatura mínima diaria en el periodo pluvial. D) temperatura máxima diaria en el periodo Pluvial (Universidad de Chile, 2011)**



**Figura 4.7 Regresión para Aconcagua en Chacabucuito: A) temperatura máxima diaria en el periodo pluvial. B) temperatura máxima diaria en el periodo deshielo. C) temperatura mínima diaria en el periodo pluvial. D) temperatura máxima diaria en el periodo Pluvial (Universidad de Chile, 2011)**



**Figura 4.8 Regresión para Vilcuya: A) temperatura máxima diaria en el periodo pluvial. B) temperatura máxima diaria en el periodo deshielo. C) temperatura mínima diaria en el periodo pluvial. D) temperatura máxima diaria en el periodo Pluvial (Universidad de Chile, 2011)**

Dado que las 3 relaciones lineales propuestas se observan adecuadas, se procede a usar y extrapolar esta relación a las celdas de toda la cuenca utilizando las relaciones lineales de las 3 estaciones, privilegiando a que en las zonas más altas, la relación de Portillo prevalezca y que en la zona más bajas, las relaciones de Aconcagua en Chacabuquito y Vilcuya prevalezcan.

Una vez obtenidas las grillas diarias de la temperatura media del aire y utilizando la información del DEM de la cuenca se procede a dividir la cuenca en 5 bandas de elevación. En este caso se consideran bandas de igual área según se indica en la Tabla 4.10.



**Tabla 4.10** Características de las bandas

<b>Banda</b>	<b>Cotas (msnm)</b>
1	956 – 2453
2	2453 – 3112
3	3112 – 3500
4	3500 – 3843
5	3843 – 5831

Una vez dividida la cuenca en bandas, donde en cada banda se calcula la temperatura máxima y mínima promediada en cada cuenca, se calcula el gradiente de temperatura y se compara con el obtenido en las estaciones meteorológicas Portillo, Aconcagua en Chacabuquito y Vilcuya en todo el periodo de calibración. Al comparar el valor promedio, así como el ancho de banda dado por la desviación estándar, se observa que existe una periodicidad anual en el gradiente y que presenta cierto ruido. Este resultado es de utilidad dado que comúnmente se tiende a calcular un gradiente promedio para todo el año.

#### **4.2.3 Viento**

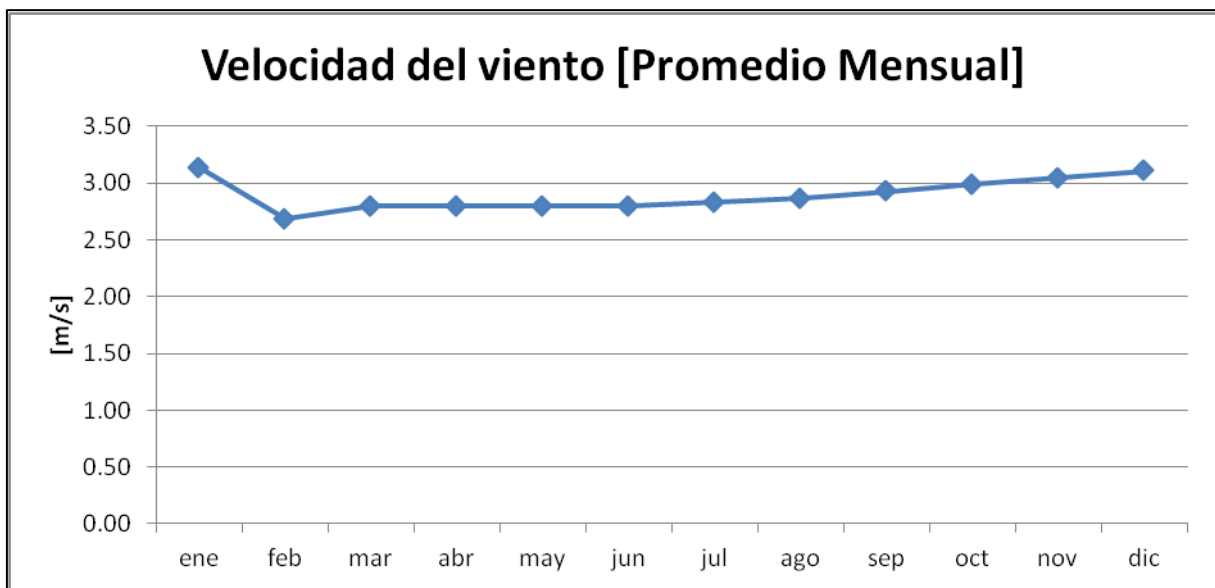
El trabajo de extrapolación de valores de velocidad del viento para todas las celdas se desarrolla mediante una única estación, esto debido a la falta de información en otros puntos, por lo que esta es la variante con mayor error a priori. El hecho de trabajar con una estación genera mayores complicaciones desde lo espacial que lo temporal, esto pues se pueden desarrollar series en el tiempo de calibración, pero estas serán iguales para todas las celdas. Esto es el supuesto más fuerte para la modelación, y es el que da una incertidumbre mayor, pues se simplifica la variación entre celdas, perdiendo el sentido del modelo distribuido, y peor aún se utilizan valores de velocidad del viento ajenos a la situación que se vive en la cordillera, por lo que los procesos asociados a estos serán constantemente subvalorados, sobre todo en los periodos de tormentas.

La estación meteorológica con mayor número y mejores datos en la zona central corresponde a la de Quinta Normal, por lo que esta es la seleccionada para el cálculo de la velocidad del viento en la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito. Es así como se procede en primer lugar a calcular promedios mensuales y un promedio total para los datos. Se poseen valores de promedios diarios para la velocidad del viento, esto a partir de agosto de 1985 a enero del 2003. Estos datos no son continuos, existiendo días sin registro. De esta forma se obtienen los valores mostrados en la tabla 4.11.

**Tabla 4.11** Velocidad del viento, promedio mensual

mes	Velocidad viento promedio [m/s]
Enero	3.13
Febrero	2.69
Marzo	2.80
Abril	2.80
Mayo	2.80
Junio	2.80
Julio	2.83
Agosto	2.87
Septiembre	2.93
Octubre	2.99
Noviembre	3.05
Diciembre	3.11

La velocidad del viento presenta un ascenso constante, aunque bajo, desde febrero a enero, siendo febrero el mes con menor valor y enero el con mayor. Como muestra la figura 4.9 esta variación no es mayormente significativa, teniéndose que la velocidad del viento, en promedio, es relativamente constante a lo largo del año, presentando un valor promedio anual de 2,9 m/s.



**Figura 4.9** Variación mensual de la velocidad del viento

## 5 Modelación Hidrológica

### 5.1 Calibración y Validación

Como la mayoría de los modelos de base física, VIC tiene varios parámetros que deben calibrarse. La implementación usual implica la calibración de seis parámetros: a) El parámetro de infiltración ( $b_i$ ) que controla la partición de precipitación a infiltración y flujo directo (un valor alto de  $b_i$  entrega menor infiltración y mayor flujo superficial); b)  $D_2$  y  $D_3$ , que son la segunda y tercera profundidad de capas ( $D_1$ , primera profundidad del suelo, se especifica a priori), influye en el agua disponible para transpiración y flujo base respectivamente; c)  $D_{s_{max}}$ ,  $D_s$  y  $W_s$  que son parámetros de flujo base.  $D_{s_{max}}$  es la velocidad máxima del flujo base,  $D_s$  es la fracción de velocidad máxima del flujo base, y  $W_s$  es la fracción del contenido de humedad máximo del suelo de la tercera capa, en la cual se produce flujo de base no lineal. Estos tres parámetros determinan la rapidez con la que el agua almacenada en la tercera capa de suelo es evacuada como flujo base.

A continuación se detallan las líneas generales de la calibración de VIC.

- $D_s$ : [ $>0 - 1$ ] Es la fracción del  $D_{s_{max}}$  donde el flujo base no lineal comienza. Con un valor más alto de  $D_s$ , el flujo base será mayor a menor contenido de agua en la capa más baja del suelo.
- $D_{s_{max}}$ : [ $<0 - \sim 40$ , depende de la conductividad hidráulica] Es el flujo base máximo que se puede producir a partir de la capa más baja del suelo (en mm/día)
- $W_s$ : [ $<0 - 1$ ] Esta es la fracción de la humedad del suelo máxima (de la capa más baja del suelo) donde el flujo base no lineal se produce. Un valor más alto de  $W_s$  elevará el contenido de agua necesaria para aumentar rápidamente el flujo base no lineal, que tiende a demorar los picos de escorrentía.
- $b_i$ : [ $>0 - \sim 0.4$ ] Este parámetro define la forma de la curva de infiltración de capacidad variable. Se describe la cantidad de capacidad de infiltración disponible como una función del área relativa grillada saturada.
- Profundidad de suelo (de cada capa): [típicamente de 0,1 a 1,5 metros] La profundidad del suelo afecta muchas variables del modelo. En general, por consideraciones de escorrentía, gruesas capas de suelo retardan los caudales máximos de temporada y aumentan la pérdida debido a la evapotranspiración. La máxima capacidad de humedad del suelo se determina dinámicamente por el cambio de espesor de suelo. A menor espesor de suelo, menor escorrentía es generada.

La calibración de estos parámetros se realiza mediante un procedimiento de prueba y error que conduce a un rango aceptable de descargas previstas por el modelo. Esto mediante inspección visual de los valores de salida de VIC, y asociando estos mismos a la mejor eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) lograda. Una vez calibrados los parámetros, se procede a realizar la modelación a través de VIC, en el cual como resultados se logran archivos de flujo y de nieve, tantos de cada una de las celdas que se definieron. La descripción de los valores entregados por cada uno de estos archivos se detallan en las tablas 5.1 y 5.2.

**Tabla 5.1** Archivo de salida “Flux”

Columna	Nombre variable	Unidad	Descripción
1	year	año	Año del presente periodo
2	month	mes	Mes del presente periodo
3	day	día	Día del presente periodo
4	hour	hora	Hora del presente periodo
5	OUT_PREC	mm	Precipitación del presente periodo
6	OUT_EVAP	mm	Evaporación del presente periodo
7	OUT_RUNOFF	mm	Escorrentía del presente periodo
8	OUT_BASEFLOW	mm	Flujo base del presente periodo
9	OUT_WDEW	mm	Intercepción en follaje del agua líquida
10: Nlayer+9	OUT_SOIL_LIQ	mm	Contenido de humedad de cada capa de suelo
Nlayer+10	OUT_RAD_TEMP	K	Temperatura radiativa de la superficie
Nlayer+11	OUT_NET_SHORT	W/m2	Radiación de onda corta neta en la superficie
Nlayer+12	OUT_R_NET	W/m2	Radiación neta en la superficie, incluye la radiación de onda corta y larga
Nlayer+13	OUT_LATENT	W/m2	Calor latente de la superficie
Nlayer+14	OUT_EVAP_CANOP	mm	Evaporación de cubierta
Nlayer+15	OUT_TRANSP_VEG	mm	Transpiración de la vegetación
Nlayer+16	OUT_EVAP_BARE	mm	Evaporación de suelo desnudo
Nlayer+17	OUT_SUB_CANOP	mm	Sublimación de la intercepción del dosel
Nlayer+18	OUT_SUB_SNOW	mm	Sublimación del paquete de la nieve del suelo
Nlayer+19	OUT_SENSIBLE	W/m2	Flujo de calor sensible de la superficie
Nlayer+20	OUT_GRND_FLUX	W/m2	Flujo de calor más almacenamiento de calor en la capa superior del suelo
Nlayer+21	OUT_DELTAH	W/m2	Velocidad de cambio de almacenamiento de calor
Nlayer+22	OUT_FUSION	W/m2	Energía neta para derretir o congelar la humedad del suelo
Nlayer+23	OUT_AERO_RESIST	s/m	Resistencia aerodinámica
Nlayer+24	OUT_SURF_TEMP	C	Temperatura de la superficie
Nlayer+25	OUT_ALBEDO	fracción	Albedo de la cobertura de suelo
Nlayer+26	OUT_REL_HUMID	fracción	Humedad relativa

Columna	Nombre variable	Unidad	Descripción
Nlayer+27	OUT_IN_LONG	W/m2	Onda larga entrante a la superficie del suelo (con vegetación)
Nlayer+28	OUT_AIR_TEMP	C	Temperatura del aire
Nlayer+29	OUT_WIND	m/s	Velocidad del viento cercana al suelo

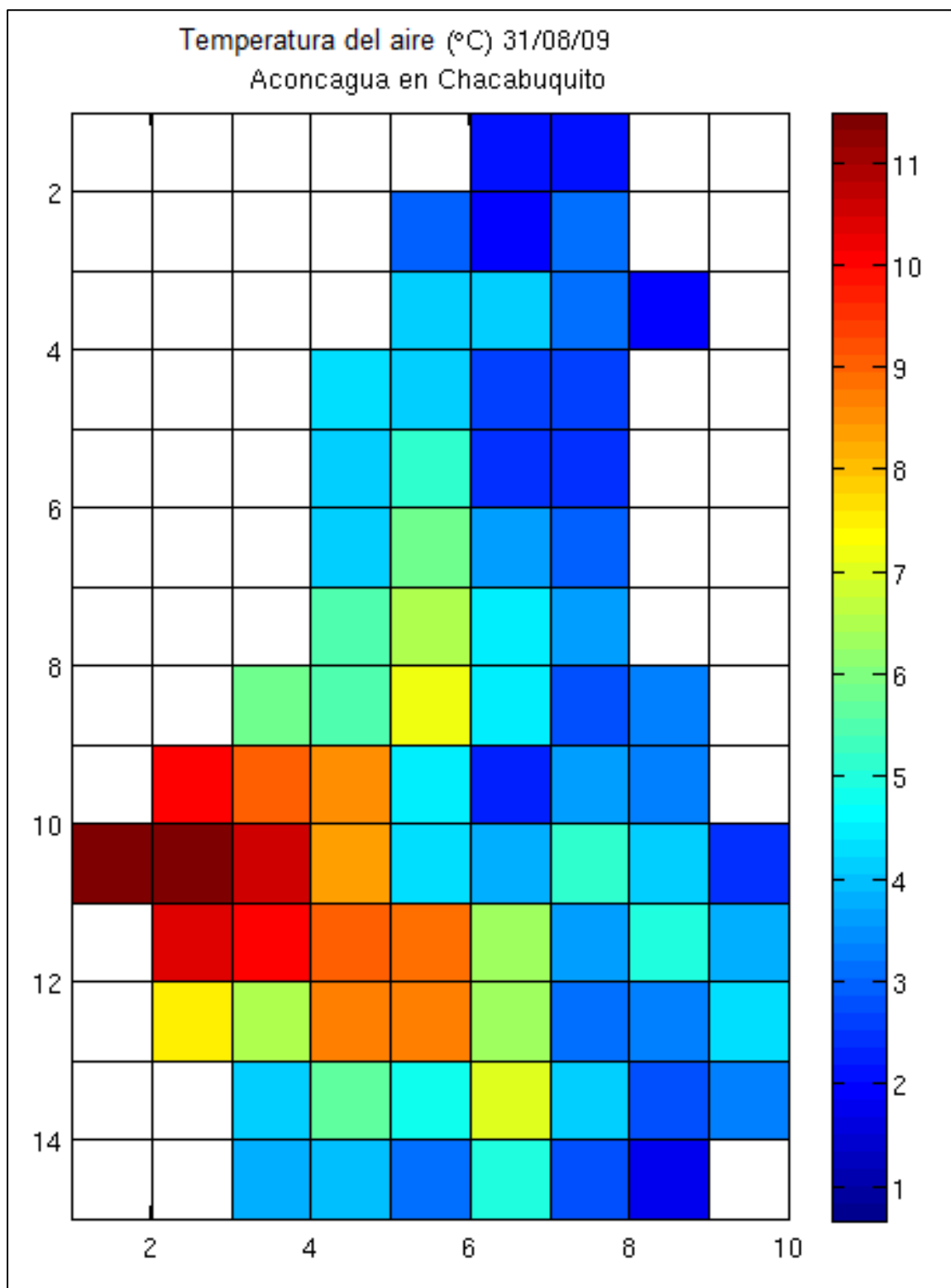
**Tabla 5.2** Archivo de salida "Snow"

Columna	Nombre variable	Unidad	Descripción
1	OUT_SWE_BAND	mm	Equivalente de agua en nieve en el manto de nieve
2	OUT_SNOW_DEPTH_BAND	cm	Profundidad del manto de nieve
3	OUT_SNOW_CANOPY_BAND	mm	Almacenamiento de nieve en la intercepción de arbustos
4	OUT_SNOW_COVER_BAND	fracción	Área fraccional de la cubierta de nieve
5	OUT_ADVECTION	W/m2	Energía transportada
6	OUT_DELTACC	W/m2	Tasa de cambio en el contenido frío en el manto de nieve
7	OUT_SNOW_FLUX	W/m2	Flujo de energía a través de acumulación de nieve
8	OUT_RFRZ_ENERGY	W/m2	Energía neta utilizada para congelar el agua líquida en la capa de nieve
9	OUT_MELT_ENERGY	W/m2	Energía de fusión en la capa de nieve
10	OUT_ADV_SENS	W/m2	Flujo neto de calor sensible en el manto de nieve
11	OUT_LATENT_SUB	W/m2	Flujo de calor latente al alza neta debido a la sublimación
12	OUT_SNOW_SURF_TEMP	C	Temperatura de la superficie de nieve
13	OUT_SNOW_PACK_TEMP	C	Temperatura manto de nieve
14	OUT_SNOW_MELT	mm	Derretimiento de la nieve
15	OUT_SUB_BLOWING	mm	Sublimación neta de nieve ventosa
16	OUT_SUB_SURFACE	mm	Sublimación neta de la superficie de la capa de nieve
17	OUT_SUB_SNOW	mm	Sublimación total del manto de nieve (superficie y soplado por el viento)

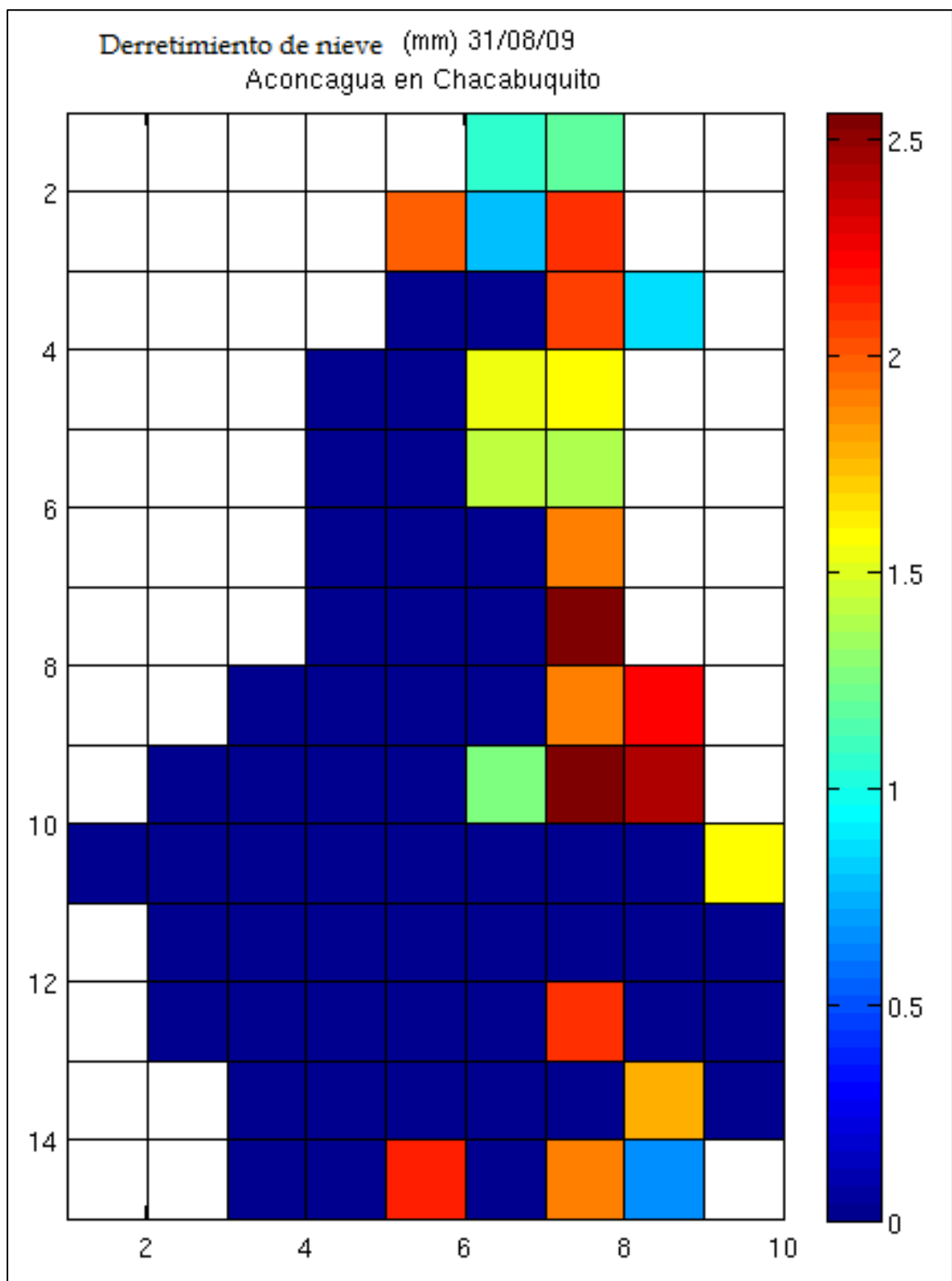
Toda esta información se tiene para cada celda de la cuenca y detallada según el paso de tiempo estipulado, por lo tanto para cada día del periodo de calibración se tiene una fotografía instantánea para cada una de las variables. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la situación de la temperatura del aire y del derretimiento de nieve para un día fijado arbitrariamente, en este caso el 31 de agosto de 2009, este día cobra importancia pues es el ultimo previo al periodo de pronóstico, por lo que cierra la condición de borde de este.

En estas figuras se puede observar, en primer lugar, la distribución de la temperatura en la cuenca, teniéndose las menores temperaturas en el sector alto, correspondiente al cordón cordillerano, y las máximas en el sector de salida de la cuenca, de menor altitud, observándose un gradiente de temperatura entre ambos sectores. En el caso del derretimiento de nieve se puede observar claramente la forma del cordón montañoso predominante, lo cual muestra que durante el periodo de deshielo serán estos los sectores que más aportaran al caudal, tal como se espera.

Además en las figuras 5.3 y 5.4 se presentan la escorrentía superficial y el equivalente en agua de la nieve.

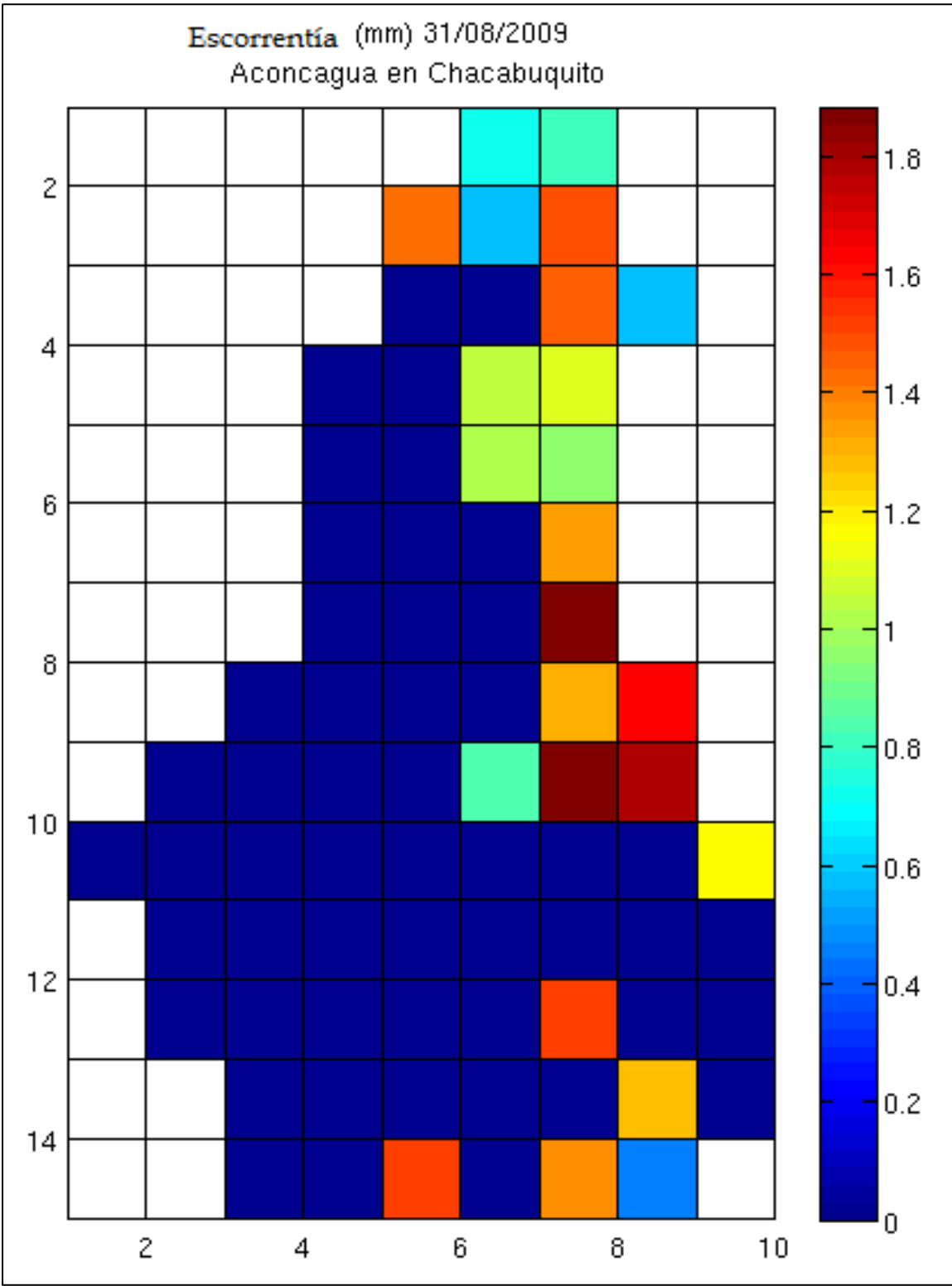


**Figura 5.1 Fotografía temperatura del aire**



**Figura 5.2 Fotografía Derretimiento de nieve**





**Figura 5.3 Fotografía escorrentía superficial**

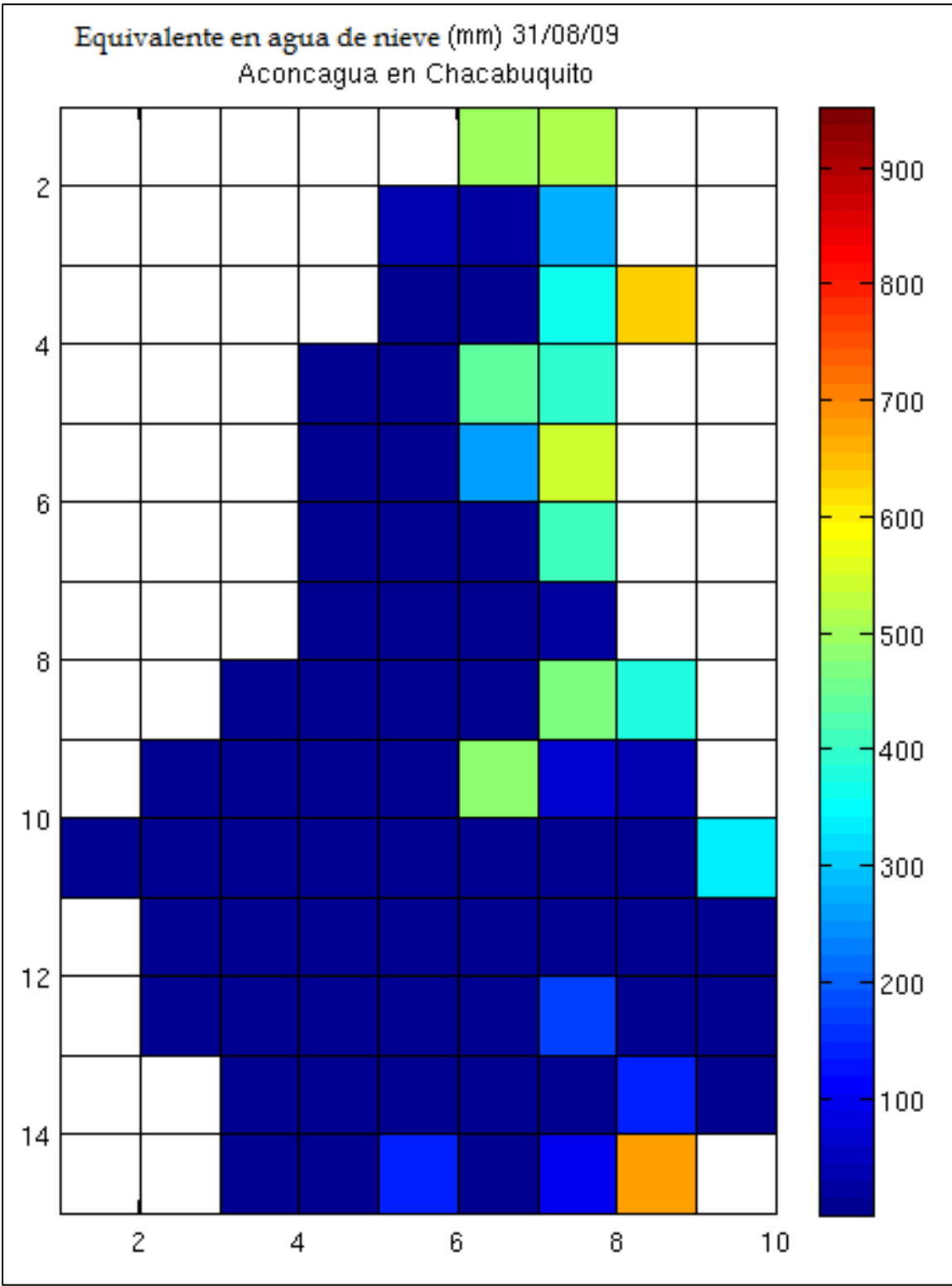
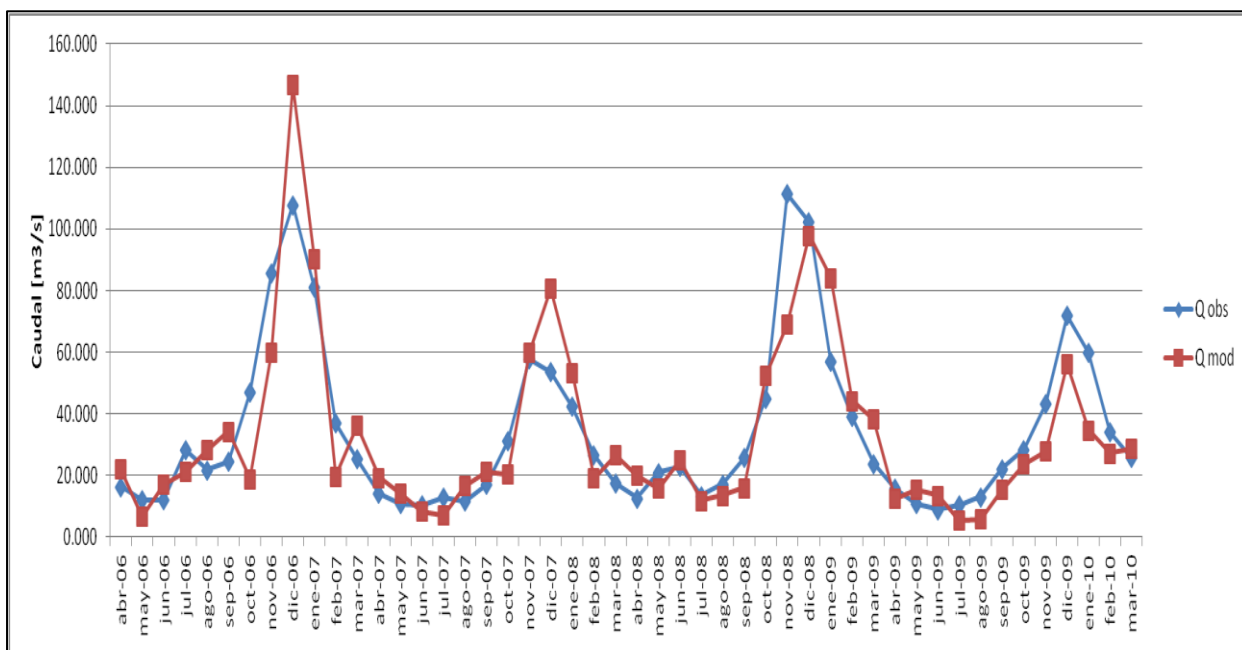


Figura 5.4 Fotografía Equivalente en agua de la nieve

Una vez obtenidos estos archivos desde el programa VIC, se procede a utilizarlos en el modelo Route, con el cual se obtiene el caudal en el punto de salida definido para la cuenca. De esta forma se presenta la calibración y validación para el periodo abril 2006 – marzo 2010.



**Figura 5.5 Calibración y validación de caudales mensuales**

De la figura 5.5 se desprende que la validación está dentro de los rangos aceptables para un modelo hidrológico, presentando las diferencias más notorias en los meses de diciembre, que es justamente el mes con máximo caudal en la cuenca de estudio, sin embargo en los demás meses del periodo de deshielo se presentan valores modelados bastante ajustados al caudal observado.

Esto se logró con los parámetros calibrados para toda la cuenca que se muestran en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3 Parámetros calibrados**

b	8.65
Ds	0.001
Ds max [mm/día]	38.448
Ws	0.9
Depth_1 [m]	0.1
Depth_2 [m]	1
Depth_3 [m]	1.5

Con estos parámetros, y utilizando los valores expuestos en la figura 5.5 se procede a calcular la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), que está dada por la siguiente ecuación.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

E= Eficiencia NS

$Q_o^t$ = Caudal observado en el tiempo t.

$Q_m^t$ = Caudal modelado en el tiempo t.

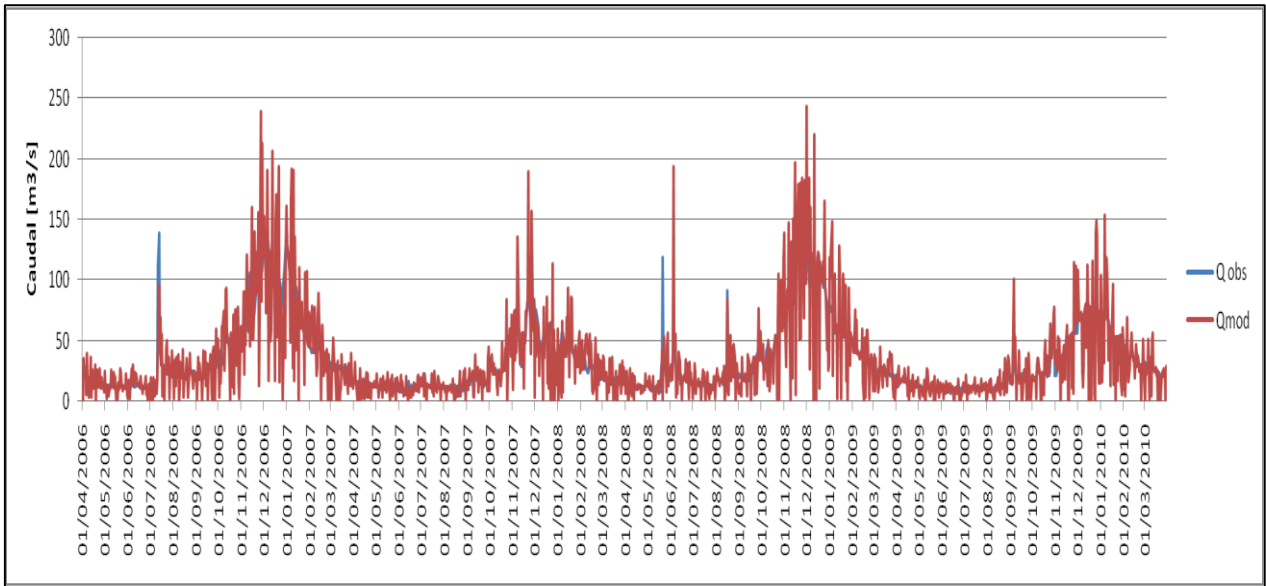
$\bar{Q}_o$ = Promedio de los caudales observados.

De esta forma se obtiene una eficiencia NS del 72,4%, por lo que la validación mensual es aceptada como correcta.

La modelación hidrológica comienza entonces con el proceso de calibración y validación, el cual tiene por objetivo principal fijar los valores que participan en el proceso de infiltración y flujo subterráneo, como lo son  $D_s$ ,  $D_{smax}$ ,  $W_s$ ,  $b_i$  y las profundidades de la capa de suelo. Mediante un proceso de inspección manual se logran resultados satisfactorios, teniéndose todos los valores dentro de sus respectivos rangos aceptables para el trabajo en VIC.

Los valores encontrados en la calibración son, además, coherentes entre sí, pues se encuentra un valor bajo de  $D_s$  que implica un flujo base bajo, al mismo tiempo que el valor de  $W_s$  es alto, lo que quiere decir que se necesita una alta cantidad de agua para aumentar el flujo base no lineal. Estos dos conceptos coinciden con lo esperado a priori para la zona de estudio, por ser de alta cordillera. Debido a lo anterior, se observa un correcto proceso de validación, con caudales similares a los reales, teniéndose problemas concentrados en los máximos de caudal, correspondiente a diciembre principalmente.

Por otro lado la calibración diaria, mostrada en la figura 5.6, entrega un ajuste no adecuado, teniéndose una eficiencia NS de 33,9% considerada baja, por lo que la validación diaria no es aceptada y no se trabaja en esa escala. La diferencia entre la validación a nivel diario y mensual radica en la alta dispersión de la diaria, debido a que no se entregan valores de radiación, variable de gran importancia para variaciones diarias, y esta al ser modelada por VIC no logra captar diferencias en un paso tan pequeño de tiempo, no así a nivel mensual donde es capaz de obviar estas variaciones.



**Figura 5.6 Calibración y validación de caudales diarios**

## 5.2 Pronóstico

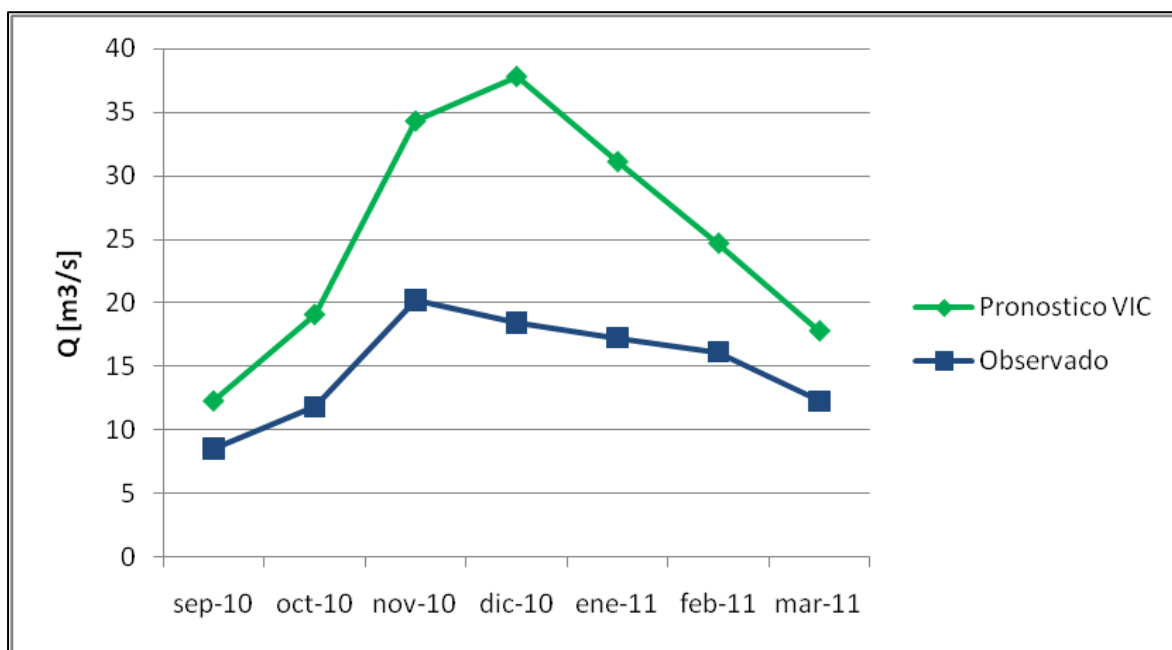
### 5.2.1 Periodo de deshielo 2010-2011

Una vez calibrados los datos se procede a realizar el pronóstico de caudales para la época de deshielo. El periodo seleccionado para esto corresponde al intervalo entre septiembre de 2010 y marzo de 2011. La Tabla 5.4 muestra los valores pronosticados, los cuales pueden asociarse a una probabilidad de excedencia del orden de 75-80%.

**Tabla 5.4 Caudal pronosticado por VIC 2010-2011**

mes	sep-10	oct-10	nov-10	dic-10	ene-11	feb-11	mar-11
Q [m <sup>3</sup> /s]	12.3	19.1	34.3	37.8	31.1	24.7	17.8

De esta forma, en la figura 5.7 se muestra la comparación entre el pronóstico de VIC y el caudal observado en Aconcagua en Chacabuquito para este periodo, donde se puede observar grandes diferencias en los valores pronosticados en los meses de noviembre, diciembre y enero, que son los meses donde el caudal es máximo. Se tiene entonces, en particular para diciembre, una diferencia del 106% entre el caudal pronosticado y el observado. Es importante destacar la naturaleza extremadamente seca del año hidrológico 2010-2011, con caudales muy bajos, lo cual genera inconvenientes a la hora de realizar un pronóstico más exacto.



**Figura 5.7 Comparación Caudal VIC contra observado, 2010-2011**

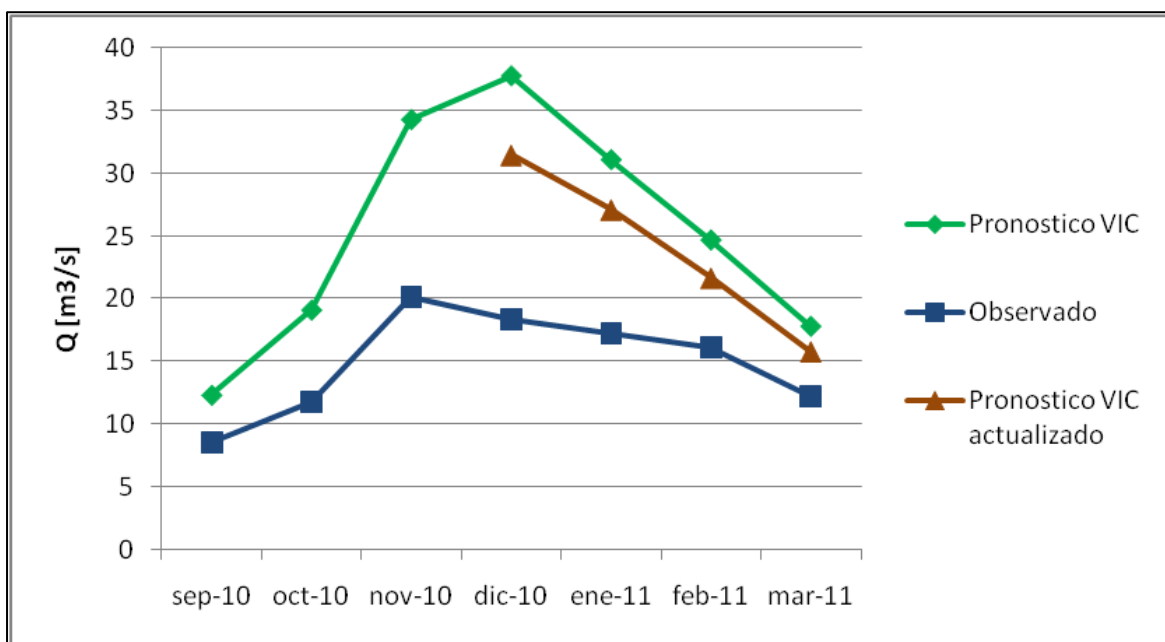
En una segunda fase, se procede a calcular un segundo pronóstico actualizado, para los meses de diciembre 2010 a marzo del 2011, esto mediante una extrapolación de los valores de entrada que exige el modelo VIC, pudiendo entonces comenzar en un periodo más avanzado.

La Tabla 5.5 muestra los valores de un segundo pronóstico para los meses antes dichos, los cuales a diferencia de los mostrados en la tabla 5.4, pueden ser asociados a una probabilidad de excedencia del 90%, es decir se obtiene una diferencia de un 10% respecto al primer pronóstico, lo cual entrega un pronóstico mejor en términos de acercarse al valor observado.

**Tabla 5.5** Pronóstico VIC 2010-2011 actualizado

mes	dic-10	ene-11	feb-11	mar-11
Q [m3/s]	31.5	27.3	21.6	15.8

Como muestra la figura 5.8, el caudal actualizado mejora el pronóstico, aunque aún se observan diferencias importantes, así por ejemplo el error del pronóstico para el mes de diciembre se reduce desde un 106% a un 71%. Se tiene entonces que los 4 meses actualizados se acercaron al valor de caudal finalmente observado respecto al primer pronóstico, por lo que se le otorga un valor positivo a la actualización del caudal. Esta mejora es del orden de un 20% para el total del periodo.



**Figura 5.8 Comparación caudal VIC actualizado, 2010-2011**

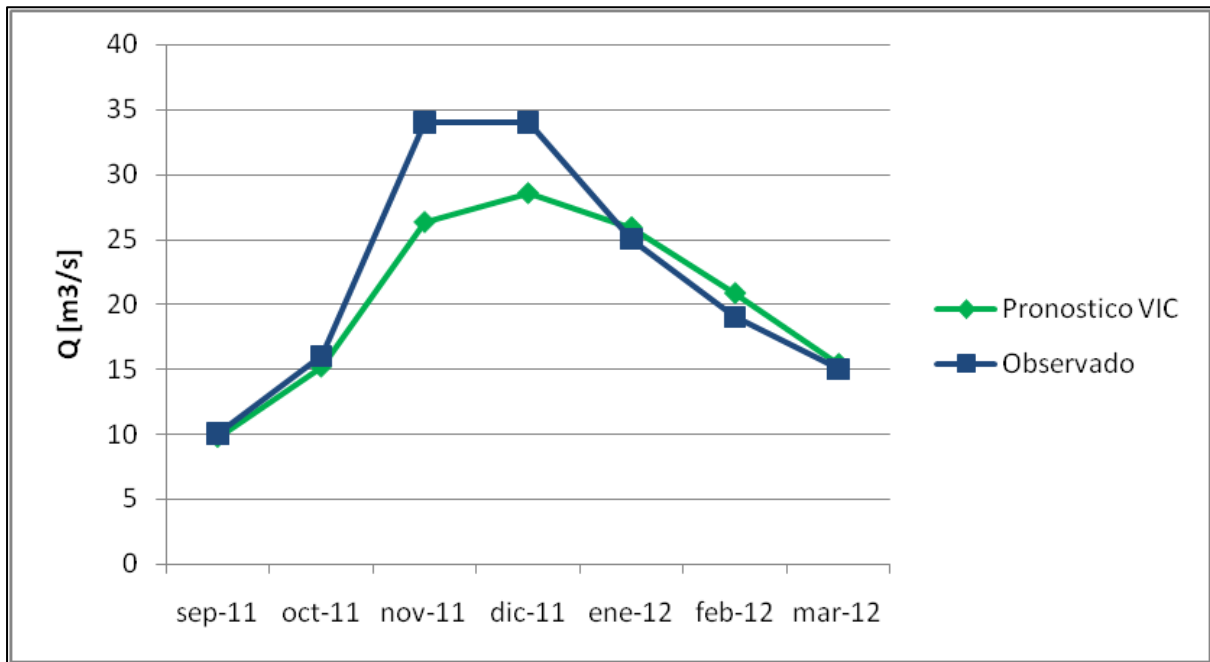
### 5.2.2 Periodo de deshielo 2011-2012

De una forma similar se procede a calcular el pronóstico de caudales de deshielo para el periodo de septiembre del 2011 a marzo del 2012, estos resultados se muestran en la tabla 5.6, estos caudales pueden ser asociados a una probabilidad de excedencia del orden de 85-90%.

**Tabla 5.6** Caudal pronosticado por VIC 2011-2012

mes	sep-11	oct-11	nov-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12
Q [m³/s]	9.8	15.2	26.3	28.6	25.9	20.9	15.4

La figura 5.9 muestra este caudal pronosticado y el caudal observado para el periodo determinado, en ella se puede ver que el pronóstico es visualmente más preciso que el del punto anterior (5.2.1), esto puede deberse a las características hidrológicas propias de cada año analizado, más que a algún aspecto del modelo VIC. Se observa también que entre el caudal pronosticado y el observado existen diferencias porcentuales máximas del orden del 10%, por lo que se considera un pronóstico preciso.



**Figura 5.9 Comparación caudal VIC contra observado, 2011-2012**

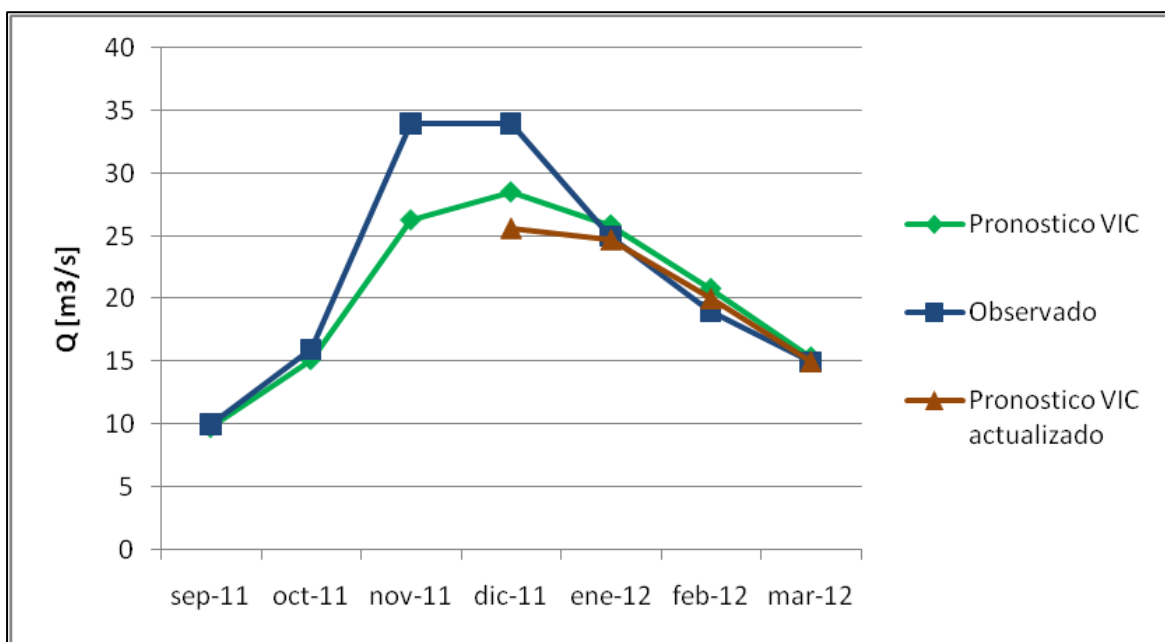
En una segunda etapa, se presenta una actualización desde el mes de diciembre, introduciendo lo ya ocurrido al modelo VIC, así se logran los resultados mostrados en la tabla 5.7, donde se tiene que los caudales pronosticados están asociados a una probabilidad de excedencia de 90-95%, por lo que se obtienen valores distintos y ligeramente menores en valor, por lo que el pronóstico se acerca más al caudal observado.

**Tabla 5.7** Pronóstico VIC 2011-2012 actualizado

mes	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12
Q [m3/s]	25.7	24.7	20.0	15.0

La figura 5.10 muestra el descenso de la curva del pronóstico actualizado respecto del primero, acercándose en valor al caudal observado, y reduciendo el error porcentual a la mitad.





**Figura 5.10 Comparación caudal VIC actualizado, 2011-2012**

### 5.3 Comparación con pronóstico DGA

En las figuras 5.11 y 5.12 se muestra la comparación gráfica de los caudales pronosticados por VIC con los caudales pronosticados por la DGA para ambos periodos analizados, se muestra además el caudal observado, para de esta forma poder ver las formas de las curvas y cual se acerca más a la realidad.

En esta comparación se puede ver que el primer pronóstico realizado por VIC es similar al pronóstico de la DGA, teniéndose las mayores diferencias porcentuales para ambos periodos en los meses de septiembre y marzo, meses en los cuales el caudal es mínimo, por lo que pequeñas diferencias numéricas en el caudal arrojan diferencias porcentuales del 20%.

Por otra parte en los meses donde el caudal es máximo, periodo de noviembre a enero, las diferencias entre ambos pronósticos es baja, del orden del 5%, y en ambos periodos analizados los dos pronósticos se encuentran por sobre el caudal observado, sobrevalorando los valores.

Sin embargo al realizar la actualización del pronóstico VIC se presentan mejoras importantes, teniéndose para ambos periodos un caudal más ajustado al finalmente observado, y además más preciso que el pronóstico de la DGA, aumentando las diferencias entre ambos pronósticos para el periodo actualizado, correspondiente a diciembre a marzo.

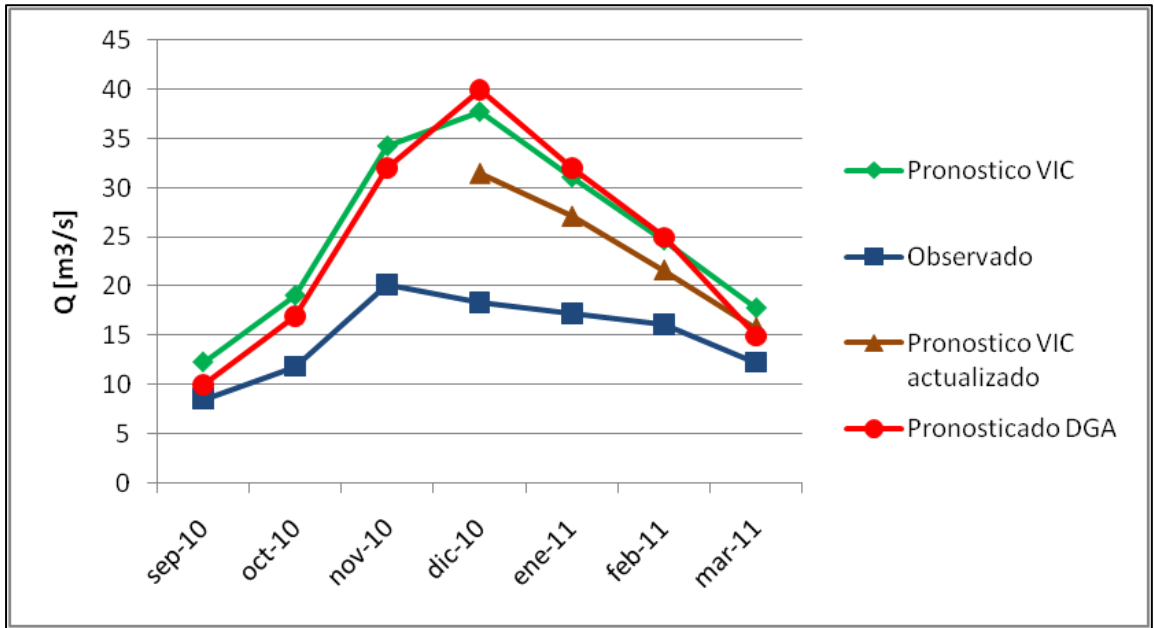


Figura 5.11 Comparación de caudales, 2010-2011

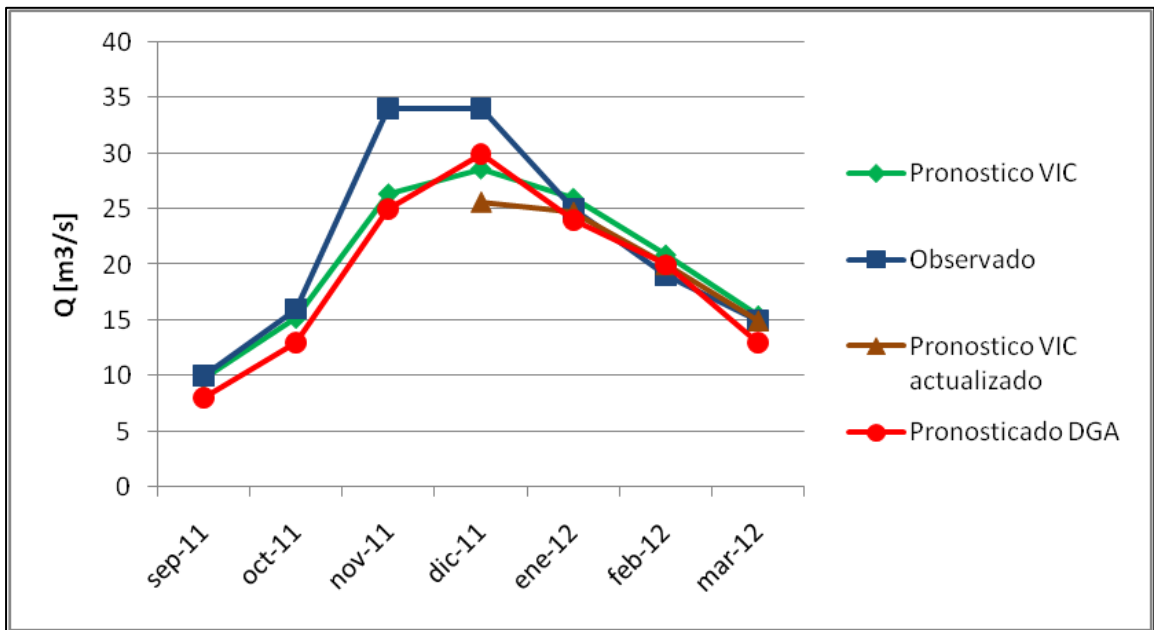


Figura 5.12 Comparación de caudales. 2011-2012

## 6 Conclusiones

El objetivo preliminar del presente trabajo de título corresponde al desarrollo de una metodología para el pronóstico de caudales de deshielo basado en un modelo hidrológico de base física, esto fue logrado en su aplicación a la cuenca de Aconcagua en Chacabucito, estudiándose en ella todos los parámetros y variantes necesarios para este trabajo, por lo que un eventual uso del modelo en otras cuencas grandes del país supone un completo nuevo trabajo en estas, basándose claro en la metodología planteada.

Para esto en el capítulo 2 se aborda de manera detallada el modelo de base física a utilizar, VIC, pero además de esto se presenta a modo de introducción la importancia de este tipo de modelos dentro del universo de modelos hidrológicos y su aporte al pronóstico que se busca realizar.

La realización de un pronóstico de caudales basado en un modelo de base física produjo una serie de complicaciones, la más fuerte de ellas es la falta de información meteorológica en la zona de estudio, sobre todo desde el punto de vista de la distribución espacial de esta. Con el fin de lograr la información necesaria para los fines buscados se debe hacer uso de software de información satelital y de sistemas de información geográfica, principalmente GRASS, para mediante métodos matemáticos conseguir los valores correctamente espaciados.

El capítulo 3 muestra la descripción geográfica completa de la zona de estudio, así como también la información hidrometeorológica disponible, con la cual se puede ver lo pobre de esta, sobre todo tomando en cuenta la utilización de un modelo que realiza una separación espacial de la cuenca, en donde cada subunidad requiere valores de entrada.

El trabajo de espaciado de las variables forzantes se presenta en el capítulo 4, donde para cada variable se muestra un trabajo distinto según se determinó que sería la mejor forma de tratar la información, es así como la precipitación se trabaja mediante gradientes y relaciones con la topografía, la temperatura del aire mediante relaciones con la temperatura del suelo entregada por imágenes satelitales y el viento es tratado mediante promedios y extrapolaciones.

Finalmente el capítulo 5 muestra el trabajo de la modelación hidrológica, presentando en primer lugar la calibración y validación, la cual es utilizada con el fin de ajustar parámetros físicos del programa, esta validación se ajusta de manera correcta, presentando mayores problemas en los picos de caudal. De esta forma se llega al pronóstico deseado, este se presenta para el periodo de deshielo, septiembre a marzo, el cual en un último paso es actualizado desde el mes de diciembre para lograr una mejor precisión del caudal.

## **6.1 Conclusiones generales**

La mayor complicación para el trabajo con un modelo de base física es la escasez de información meteorológica en la zona de estudio, y más general en la zona centro de Chile, es por esto que este tipo de modelos no es muy usado en la actualidad, teniéndose en su mayoría modelos agregados para el pronóstico de caudales.

El uso de metodologías para la distribución espacial de parámetros y variables forzantes es vital entonces en un trabajo de este tipo, siendo entonces este proceso el de mayor sensibilidad para el pronóstico de caudales, por lo que necesita de una gran precisión para su estimación.

La simulación del caudal para la calibración y validación entrega resultados aceptables, sin embargo presenta el problema de que el mayor error se observa en los meses de diciembre, que es justamente el mes con mayor caudal de deshielo, observándose comúnmente una sobrevaloración del valor en ese mes.

El pronóstico de caudales para el periodo de deshielo sigue presentando el mismo problema que la validación, sobrevalorando el mes de diciembre, y sus meses inmediatamente aledaños, por lo que se propone una actualización del pronóstico a partir de diciembre, con esto los valores se ajustan de mejor manera, aunque siguen siendo más altos que el caudal observado, esto pues el pronóstico meteorológico interno del modelo VIC no es mayormente sensible a pequeñas variaciones entregadas en un mes o dos, y se basa en la cadena completa de información entregada, sin la cual no genera caudales válidos.

## **6.2 Comentarios sobre la información disponible**

El primer paso de trabajo es la delimitación de la cuenca, a partir de la cual se realiza todo el trabajo futuro. Esta se realizó mediante el uso de información satelital de elevación geográfica. Esta información se considera de alta precisión, por lo que no se le hacen correcciones y se trabaja directamente mediante un programa de sistema de información geográfica.

Respecto a la descripción de la zona, la información geomorfológica y de clima es utilizada como referencia, siendo la información de suelo la más importante y la de mayor sensibilidad e incertidumbre otorgada al programa, por lo que una incorrecta distribución de valores se verá reflejada en una incorrecta estimación de caudales.

En el punto 3.3 puede observarse la escasa cantidad de estaciones con información meteorológica disponible, contando con dos estaciones efectivas para precipitación y temperatura, y con una para viento. Es por esto, y en función del gran tamaño de la cuenca de estudio que debe hacerse un trabajo de distribución de variables para cada una de las celdas en que se ha dividido la zona de estudio. Este trabajo es la mayor limitante para el pronóstico realizado, siendo la causa de los errores en la estimación de caudales.

En resumen, cada uno de los criterios adoptados para caracterizar espacialmente la zona de estudio (cálculo de gradientes de precipitación, correlaciones entre temperatura del aire y suelo, y la extrapolación de datos de viento) incide directamente en la calidad de las simulaciones de VIC, especialmente en lo que respecta a la distribución de la escorrentía.

### **6.3 Comentarios sobre parámetros y variables forzantes**

En función de distribuir los datos requeridos por cada una de las celdas de VIC se realizó distintas metodologías para cada uno de los parámetros y variables necesitadas. Es así como para los parámetros de vegetación y suelos se trabajó con información satelital directa, es decir que aquella que se obtiene sin necesidad de procesarla, solo se debe ajustar a la máscara correspondiente a la zona de estudio, para luego ser grillada. Luego, los resultados obtenidos de este proceso se consideran de alta precisión y confiables, quitándoseles peso en posibles errores de estimación de caudales.

En definitiva, las tres metodologías expuestas para la distribución de variables forzantes generan error en el pronóstico, sin embargo es la única forma de lograr valores, pues no se poseen más valores en terreno para estas variables. Cada una de las metodologías explicadas genera imprecisiones distintas, las cuales están asociadas a la rigidez del proceso realizado, es así como la velocidad del viento es la variable menos precisa del modelo, sin embargo la temperatura y la precipitación también muestran problemas para valores extremos, que son justamente los más importantes y sensibles al momento de trabajar caudales de deshielo.

### **6.4 Resultados de la modelación hidrológica**

En el proceso de pronóstico de caudales es importante tener claro desde un comienzo que este se realizó solo para dos periodos de deshielo, los que casualmente corresponden a años hidrológicamente secos, teniéndose caudales observados que pueden ser asociados a una probabilidad de excedencia de un 85 o 90%. Esto hace que no pueda tomarse una decisión definitiva acerca de lo valedero del pronóstico mediante VIC, ya que no se ha trabajado con años húmedos. Sin embargo el registro de pronósticos realizados por la DGA muestra que son justamente los años secos los que mayores errores tienen asociados, por lo que puede ser una buena base.

El pronóstico realizado para ambos periodos muestra importantes diferencias, pues para el periodo 2010-2011 no se encuentran valores muy similares, sin embargo para 2011-2012 se tiene un ajuste correcto. Esto tiene que ver mayormente con las características hidrológicas de ambos años, más que con el modelo VIC en si, esto pues en comparación con modelos que no son de base física, los errores son similares. Si bien el modelo VIC reduce ligeramente los errores asociados al periodo 2010-2011, estos siguen siendo importantes, por lo que se concluye que en función de lo impreciso que pueden ser las variantes forzadas del modelo, este no aporta mayormente al pronóstico de caudales de deshielo.

Esto último se ve también complementado por la comparación al pronóstico DGA, el cual no muestra importantes mejoras en un primer término, teniéndose valores simulados del mismo orden.

## **6.5 Resultados de la actualización del pronóstico**

La actualización del modelo VIC a partir del mes de diciembre en el periodo de deshielo entrega una mejora en el pronóstico generado, variando incluso la probabilidad de excedencia asociada a esto, en un rango de 5%, esto reduce el error respecto al caudal observado y entrega una pequeña mejora respecto del pronóstico DGA, sin embargo se vuelve a observar una diferencia notable entre los periodos trabajados, teniéndose que para 2010-2011 se sigue con un error importante.

Una decisión importante en el proceso de actualización tiene que ver con el periodo determinado, ya que una actualización mensual no presentaba mejoras en VIC, debido a las bajas variaciones, es por esto que se toma el conjunto de meses de septiembre a noviembre, para así dar más peso a la nueva información.

Se observa entonces una ligera mejora, que se ve influenciada por las variables forzantes otorgadas a cada celda del modelo VIC, es así como la aproximación de datos en meses inmediatamente previos no logra otorgar una mejora significativa, sin embargo al verse esta corrección baja, se infiere que con una mejor calidad de datos entrantes se obtendría una mejor precisión en la actualización.

Por lo tanto, a pesar de no mostrar una corrección muy significativa, la actualización si otorga un nuevo pronóstico, y se determina como una herramienta importante para generar caudales simulados de mayor precisión

## **6.6 Recomendaciones**

La utilización de un modelo de base física en las cuencas Chilenas genera una serie de inquietudes para su correcto funcionamiento, a través de lo cual surgen recomendaciones para su implementación futura.

El principal problema para que este tipo de modelos adquiera mayor precisión es sin duda la baja cantidad de datos que se tienen para generar las variantes forzantes, esto asociado a la baja densidad de estaciones que entreguen temperatura, precipitación y velocidad del viento en las cuencas. Situación que se ve aún más crítica en cuencas altas con marcada presencia del cordón cordillerano, donde las aproximaciones son la única forma de tener valores. Por lo tanto una red más amplia de estaciones correctamente distribuidas en el territorio se hace de vital necesidad para otorgar una correcta precisión a las forzantes, y de esta forma obtener mejores resultados.

En esa misma dirección es importante la generación de una cuenca modelo en montaña, con una instrumentación total de la misma, esto orientado mayormente a

entender y modelar de mejor manera la parte nival del modelo. Esto ya se está comenzando a desarrollar en el marco del proyecto DGA con la División Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile en el cual se encuentra la presente investigación.

Respecto a la metodología de VIC y su posible uso futuro, se recomienda la creación de un banco de información completo a nivel nacional sobre suelos y vegetación, con lo cual se podría dar una distribución de la misma de manera mucho más precisa a las celdas que necesita el programa. Esto además ayuda a reducir los tiempos de cálculo, que en el caso del presente estudio fueron muy largos, y de esta forma poder implementar una mayor cantidad de cuencas. El presente trabajo fijó el tamaño de las celdas de VIC en 5 km, esto basado en intentar emular el concepto de unidades de respuesta hidrológica, sin embargo se propone para futuros estudios la comparación de distintos tamaños de celda para una misma cuenca, con el fin de encontrar el tamaño adecuado en base a la prueba de valores simulados.

Finalmente, en cuanto a la actualización del pronóstico, esta entrega una mejora del mismo, la cual debería ser más importante mediante la implementación de mejores datos. Sin embargo un trabajo de mayor precisión en la corrección de los valores pronosticados debiese ser la asimilación de los caudales ya vistos en el periodo, es así como una realización de este tipo de metodología es altamente recomendada, a pesar de su alta complejidad. Por otro lado al tenerse una pequeña mejora, se propone también una actualización para el actual modelo DGA, para de esta forma, mediante sus métodos, mejorar el pronóstico para la segunda mitad del periodo de deshielo, pues al ser este periodo de una duración de siete meses, se hace necesaria una separación para obtener mayor precisión en la simulación.

## 7 Referencias Bibliográficas

1. BOWLING, L; POMEROY, J; LETTENMAIER, D. 2004. Parameterization of Blowing-Snow Sublimation in a Macroscale Hydrology Model. *J. Hydrometeorol*, 5, 745–762.
2. CADE-IDEPE. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Aconcagua. Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.
3. CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. 1994. *Hidrología Aplicada*. Editorial McGraw-Hill.
4. CORRAL, C. 2004. Desenvolupament d'un model hidrològic per incorporar informació del radar meteorològic. Aplicació operacional a la conca del riu Besòs. Tesis Doctoral, Universidad Politècnica de Catalunya.
5. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, UNIVERSIDAD DE CHILE. 2008. Investigación de Nieves y Escorrentía de Deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de Modelos de Simulación de Nival y de Pronóstico de Volúmenes de Deshielo. Estudio realizado para la Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. S.I.T. N°165.
6. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, UNIVERSIDAD DE CHILE. 2011. Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel; y estimación de los efectos del cambio climático. Estudio realizado para la Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. S.I.T. N°211.
7. GOBIERNO DE CHILE, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. 1999-2011. Pronóstico de disponibilidad de agua. Temporada de riego.
8. ESPILDORA, B; BROWN, E; CABRERA, G; ISENSEE, P. 1975. *Elementos de hidrología*. Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Chile.
9. GAO, H; TANG, Q; SHI, X; ZHU, C; BOHN, T; SU, F; SHEFFIELD, J; PAN, M; LETTENMAIER, D; WOOD, F. 2009. Water Budget Record from Variable Infiltration Capacity (VIC) Model Algorithm Theoretical Basis Document.
10. LIU, YUGIONG; GUPTA, HOSHIN. 2007. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43.
11. MAURER, E. 2011. VIC Hydrology Model Training Workshop. Taller Centro de Cambio Global Pontificia Universidad Católica de Chile.



12. MAURER, E; WOOD, A; ADAM, J; LETTENMAIER, D. 2002. A Long-Term Hydrologically Based Dataset of Land Surface Fluxes and States for the Conterminous United States. American Meteorological Society, 15, 3237-3251.
13. MENDOZA, P. 2011. Pronóstico de caudales de crecida mediante un modelo hidrológico distribuido y la asimilación de datos observados. Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
14. PEÑA, H; NAZARALA, B. 1985. Consideraciones acerca de pronósticos de deshielo.
15. SCS- (Soil Conservation Service). 1972. National Engineering Handbook. Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
16. SINGH, V. P. 1995. Watershed Modeling. En V. P. Singh (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, 23, 1-22.

#### Páginas Web

17. Core Spatial Datasets, FAO [en línea] < [www.fao.org/climatechange/54273/en/](http://www.fao.org/climatechange/54273/en/)> [consulta: 10 de junio de 2011]
18. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas [en línea] < <http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Paginas/default.aspx>> [consulta: 05 de abril de 2012]
19. NASA. Modis Website. [en línea] <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>> [consulta: 01 diciembre 2011]
20. UNIVERSITY OF WASHINGTON. Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model [en línea] <<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/>> [consulta: 04 abril 2012]

## ANEXO A Correr VIC

El siguiente instructivo para correr el modelo VIC esta desarrollado para ser ejecutado desde el sistema operativo Linux.

- Descargar el código
  - La descarga de la versión utilizada de VIC se realiza desde <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/SourceCode/Download.shtml>.
  - El archivo viene comprimido en un archivo tar, se extrae via: `tar -xvzf filename;` donde `filename` = nombre del archivo descargado, ejemplo `VIC_code_4.1.1.tar.gz`
- Compilar VIC
  - Cambiar el directorio, usando `cd`, hasta el directorio del código.
  - En la consola de comandos escribir: `make`
  - Si se completo sin errores aparecerá un archivo llamado `vicNI` en el directorio, este archivo es el ejecutable por el modelo.
- Correr VIC
  - En la consola, escribir: `vicNI -g global_parameter_filename;` donde `global_parameter_filename` = nombre del archivo de parámetros globales correspondiente al proyecto.

De esta forma, y mediante la metodología mostrada en el informe, se logran los archivos de salida del modelo VIC.

## ANEXO B Correr modelo de ruteo

El siguiente instructivo para correr el modelo Route esta desarrollado para ser ejecutado desde el sistema operativo Linux.

- Descargar el código
  - La descarga de la versión utilizada de VIC se realiza desde <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/SourceCode/Download.shtml>
  - El archivo viene comprimido en un archivo tar, se extrae via: `tar -xvzf filename;` donde filename = nombre del archivo descargado, ejemplo `route_code_1.1.tar.gz`
- Compilar Route
  - Cambiar el directorio, usando `cd`, hasta el directorio del código.
  - Deben haber dos carpetas: "samp\_inputs" and "src"; `cd` a "src"
  - En la consola de comandos escribir: `make`
  - Si se completo sin errores aparecerá un archivo llamado `rout` en el directorio, este archivo es el ejecutable por el modelo.
- Correr route
  - En la consola, escribir: `rout input_filename;` donde `global_parameter_filename` = nombre del archivo de parámetros globales correspondiente al proyecto.

De esta forma, y mediante la metodología mostrada en el informe, se logran los archivos de salida del modelo Route.

## ANEXO C Pronóstico actual DGA

A continuación se muestra, de manera resumida, las principales aristas del pronóstico actual realizados por la DGA, basado en el documento "Consideraciones acerca de pronósticos de deshielo" de Peña y Nazarala.

La Dirección General de Agua realiza un pronóstico de caudales de deshielo del el año 1974, el periodo corresponde a septiembre-marzo, para ello se utiliza la información hasta el 31 de agosto.

La DGA ha utilizado en sus previsiones métodos estadísticos, específicamente técnicas de regresión lineal. Así se busca establecer una relación funcional entre:

$$Q = f(X1 + X2 + \dots + Xn)$$

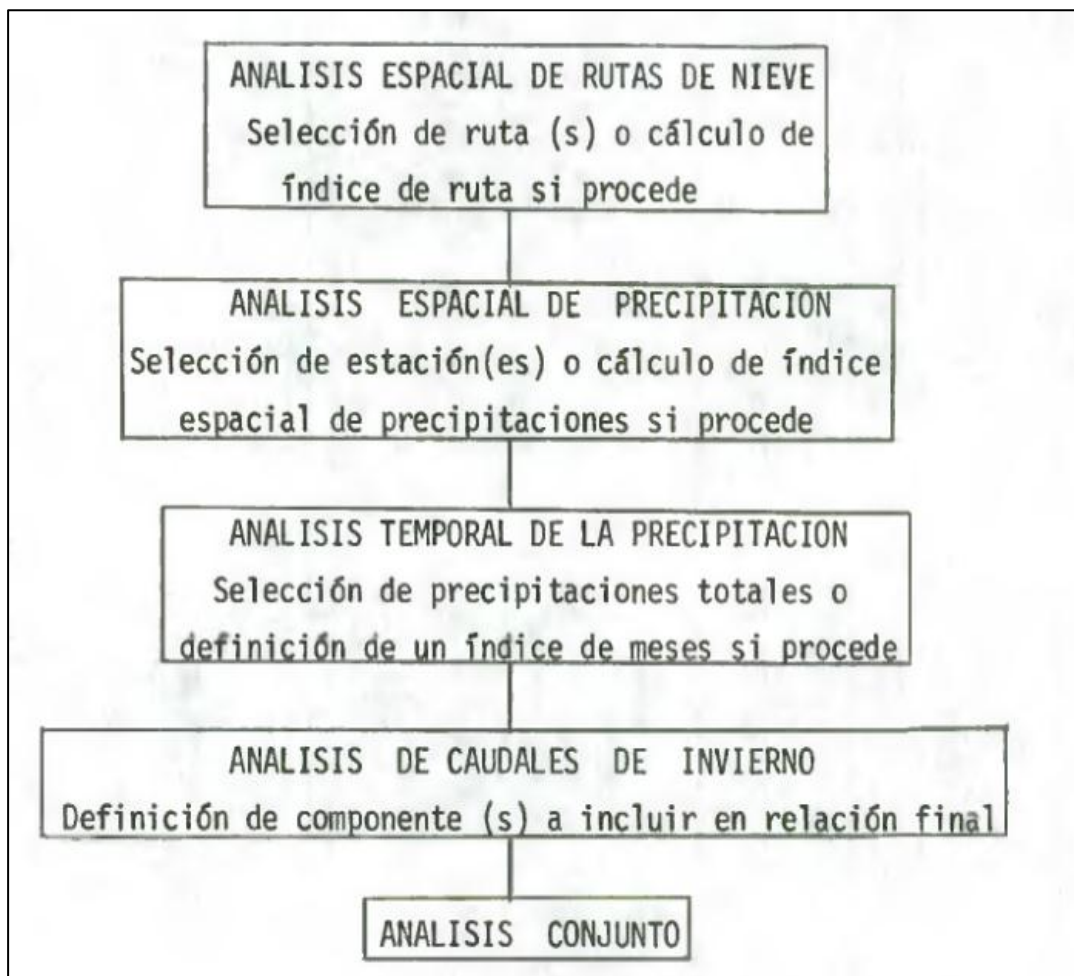
Con Q= función vinculada a los caudales incógnitas  
X1, X2,..., Xn= Variables predictivas.

Para la obtención de la relación de pronóstico se emplean en general métodos analíticos de correlaciones múltiples y en ocasiones procedimientos gráficos. El método de correlaciones múltiples tiene la ventaja de utilizar cualquier numero de variables explicativas, lo que dependiendo de las características hidrológicas del río, puede resultar imprescindible.

Con el propósito de disminuir eventuales inconvenientes, sistemáticamente se grafican los valores históricos graficados y calculados, para verificar una adecuada distribución de los residuos, detectar los valores erróneos y analizar las anomalías.

En ocasiones cuando se trata de analizar la representatividad espacial de registros de igual naturaleza (registros pluviométricos o rutas de nieve) o la importancia de la distribución temporal (precipitaciones mes a mes), las técnicas de regresión lineal se usan para la confección de índices, los cuales utilizan los coeficientes obtenidos para cada variable en la ecuación de regresión.

El proceso de selección de las relaciones de pronóstico, en general, se efectúa siguiendo una frecuencia preestablecida que se muestra en la figura C.1.



**Figura C.1 Proceso de selección de variantes (Peña y Nazarala, 1985)**

Respecto a las variables predictivas, se han utilizado como variables explicativas las precipitaciones totales de los meses de invierno, las precipitaciones mensuales, la acumulación de nieve máxima anual, los caudales mensuales del periodo de invierno y las temperaturas medias mensuales. En nuestro país las variables mejor correlacionadas con los caudales de deshielo son las precipitaciones y la acumulación de nieve. No es posible obtener una conclusión definitiva en relación a la mayor confiabilidad de una respecto a la otra.

La evaluación de la bondad de un pronóstico es esencialmente un problema de tipo práctico relacionado con las características hidrológicas del río, el tipo de año que se está pronosticando y sobre todo con el uso que se quiera dar a la información. Se define el error como:

$$E = 100 * \frac{Qp - Qm}{Qm} \%$$

Con Qp= Caudal pronosticado  
Qm= Caudal medido.

Este criterio puede resultar muy exigente en años secos y poco en años con caudales altos, además no considera distinta variabilidad hidrológica entre diversos ríos.

Las principales causas de error en los pronósticos se pueden resumir en: Representatividad y consistencia de la información básica; Limitaciones del método estadístico; Variables no consideradas.

A modo de conclusión, se puede decir que no existe una ventaja significativa de un método en la realización de un pronóstico, de modo que frecuentemente los resultados que se obtienen por diversos métodos y utilizando distinta información, la cual esta normalmente muy correlacionadas entre sí, no ofrece diferencias substanciales. No obstante lo anterior, existen años en los cuales los procedimientos entregan valores claramente discordantes. En estos casos la elección entre los procedimientos es un problema de análisis hidrológico de las condiciones concretas de ese año y de interpretación de las diferencias. En este análisis juega un papel clave las “apreciaciones subjetivas” del hidrólogo.

## **ANEXO D Anexos Digitales**

Se adjunta un DVD con el siguiente contenido:

- Copia a color del presente informe, con el fin de mostrar de mejor forma las figuras presentadas.
- Carpeta VIC: En su interior se encuentran tanto el programa VIC como el Rote, en sus versiones utilizadas para el presente trabajo. Además se presentan en la subcarpeta "Chacabuquito" los sets de datos para los pronósticos realizados, en ambos periodos de deshielo y su actualización (que se denota con una "B" junto al periodo).
- Carpeta TEMPERATURA: Dentro se presenta el archivo LOADLST (archivo MATLAB), ese archivo abre los .mat con los datos de las estaciones meteorológicas y luego aplica la correlación hallada a todas las imágenes satelitales diarias. Además la carpeta "imágenes", con las imágenes de todas las correlaciones y el valor de  $r^2$ .
- Carpeta PRECIPITACION: Se presenta una serie de archivos Excel (leer el documento de texto "CONTENIDO") en los cuales se muestra la estimación de gradientes anuales, distribución de precipitación a la estación base, explicación de esta distribución y datos utilizados.
- Carpeta VIENTO: Se presentan los valores utilizados de velocidad del viento, el cálculo de los promedios mensuales y de la varianza a utilizar.
- Carpeta PRONOSTICO DGA: Se presenta los valores pronosticados por la DGA para los periodos de deshielo entre 1999 y 2011, y se comparan con los valores observados, todo esto en la cuenca de estudio.