



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO DE CHILE



SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

DE UN MODELO DE DERRETIMIENTO DE NIEVES
USANDO SIG E IMAGENES LANDSAT Y NOAA

FERNANDO ESCOBAR¹
ROGER BALES²
VERONICA POZO³

PARTE 2

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

Este trabajo es el resultado de las investigaciones que se están realizando en el Departamento de Hidrología y Recursos Acuáticos (DHA) de la Dirección General de Aguas (DGA)- M.O.P. para entender la relación entre los procesos que ocurren durante el derretimiento de la nieve, en cuencas de montaña de los Andes, y la producción de agua dulce. El objetivo principal de esta investigación es comprender mejor la relación entre la producción de agua dulce y las entradas de agua y energía, para transformar estas relaciones en un modelo de derretimiento de la nieve. Las cuencas de montaña se caracterizan por sus fuertes pendientes, su alto grado de heterogeneidad en importantes propiedades que afectan el derretimiento de la nieve y la escorrentía. Este trabajo se basa en dos convenios:

El primer convenio es con la Dirección General de Aguas (DGA) con la Universidad de Arizona-Tucson (UAT) y la Universidad de Santa Bárbara (UCSB).

El segundo convenio es con el Centro de Estudios Científicos (CEC) de la Universidad Católica (UC), dentro del marco de un programa de cooperación con la institución estatal Canadiense.

El primer convenio, es proveer los recursos necesarios para establecer un programa de largo plazo, y buscar las bases científicas de modelación en hidrología superficial. Con el primer convenio se está trabajando principalmente con imágenes de satélite RADARSAT obtenidas del segundo convenio con la oficina de datos de satélite SIR-C obtenidas por el transbordador Endeavour en uno de sus vuelos para su uso en investigaciones de las características de la nieve durante el primer convenio.

Tabla 1 Características de las estaciones de medición - 0.167 a.

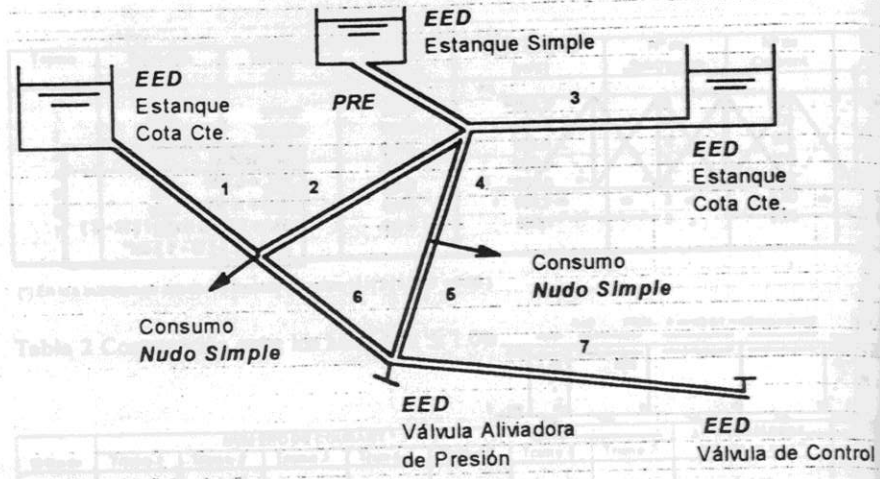


Figura 2 Esquema de la red ejemplo.

Version de Curso	Nombre	Descripción	Estado	Fecha	Medio	Medio
MC	MC	MC	Estado	2	2	Estado
MC 1	MC	MDH	Estado	No	No	Medio / Medio
MC 2	MC	MDH	Estado / Estado	No	No	Medio / Medio
MC 3	MC	MC / MC-RES	Estado	No	No	Medio

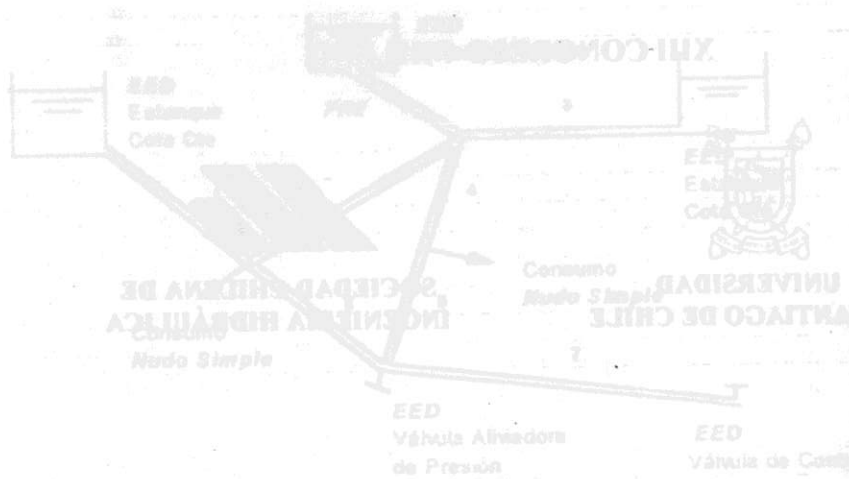


Figura 2 Esquema de la red ejemplo.

2.1.- APLICACION DE UN MODELO DE DERRETIMIENTO DE NIEVES (SRM3-2) USANDO SIG E IMAGENES LANDSAT Y NOAA

FERNANDO ESCOBAR¹
 ROGER BALES²
 VERONICA POZO³

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es dar a conocer las últimas investigaciones que se están realizando en la Dirección General de Aguas (DGA)- M.O.P. para entender la relación entre los procesos que controlan la acumulación y el derretimiento de la nieve, en cuencas de montaña de los Andes Chilenos. Este conocimiento es fundamental para desarrollar una capacidad de predicción que describa la respuesta de una cuenca a las entradas de agua y energía y, para transformar estas entradas en caudales de deshielo. Las cuencas de montaña se caracterizan por sus fuertes pendientes, y topografía variable y, por ende, su alto grado de heterogeneidad en importantes propiedades que controlan la acumulación, el derretimiento de la nieve y la escorrentía.

Este trabajo forma parte de dos convenios:

- La Dirección General de Aguas (DGA) con la Universidad de Arizona Tucson (UAT) y la Universidad de California de Santa Barbara (UCSB).
- La DGA y el Centro de Percepción Remota (CPR) de la Universidad Católica (UC), dentro del cual, últimamente se suscribió un programa de cooperación con la institución estatal Canadiense (CCRS).

El propósito de estos convenios, es proveer los recursos necesarios para establecer un programa de cooperación de largo plazo, y buscar las bases científicas de modelación en hidrología de nieves en cuencas de montaña. Con el primer convenio se está trabajando principalmente con imágenes LANDSAT y en el segundo, con imágenes NOAA. También se ha incorporado a la investigación imágenes de radar: RADARSAT obtenidas del segundo convenio con la oficina de difusión Canadiense e imágenes SIR-C obtenidas por el transbordador Endeavour en una de sus misiones, solicitado expresamente para su uso en investigaciones de las características de la nieve en el Glaciar Echaurren bajo el primer convenio.

¹ING. Dirección General de Aguas - M.O.P.
²PH.D. University of Arizona, Tucson, U.S.A.
³GEOG. Dirección General de Aguas - M.O.P.

1.- INTRODUCCIÓN

Las áreas cubiertas de nieve estacionales de las zonas montañosas de la tierra, son componente importante del ciclo hidrológico global. A pesar de que su área es limitada, el manto de nieve en dichas zonas aporta la mayor parte de la escorrentía a los caudales y también recargas de agua sobre amplias áreas en latitudes medias. Ellas son igualmente, sensibles indicadas de los cambios climáticos. Muchas regiones elevadas de la tierra son susceptibles a destrucciones ambientales que afectarían tanto a su equilibrio ecológico como a las economías regionales.

En regiones áridas como en los Andes Chilenos, los ríos de montaña son explotados para la generación hidroeléctrica como también para la agricultura y abastecimiento de agua potable. El gobierno chileno estimula el crecimiento económico y seguir adelante con la demanda proyectada. El gobierno de Chile espera doblar la capacidad de generación durante los próximos años. Este desarrollo tiene un lugar relevante a pesar de los deterioros ambientales en los ecosistemas y recursos de montaña.

Científicos de muchas disciplinas en ciencias de la tierra y biológicas han estudiado componentes del medioambiente de montaña. En los EE.UU., muchos de estos estudios de los últimos 10 a 15 años fueron motivados por la preocupación sobre el impacto de la deposición de ácidos en ecosistemas locales. Estudios futuros también se preocuparán de los impactos potenciales de cambios climáticos regionales y globales en áreas de montaña. La evaluación de dichos impactos deberá ser a una escala regional y local y cubrir las principales regiones de montaña de la tierra.

En las áreas cubiertas de nieve estacionales de la mayoría de las regiones montañosas, la escorrentía del derretimiento es responsable tanto del caudal máximo instantáneo anual, como de la mayor parte del volumen anual de escorrentía. Por lo tanto, es importante entender los procesos que controlan la escorrentía de deshielo para modelar los caudales en los propósitos de la predicción de caudales para el abastecimiento de agua y estudios de crecidas. También es de gran relevancia en épocas de sequías.

Las cuencas de montaña se caracterizan frecuentemente por su terreno áspero y variado. Es así, como su elevación, pendiente y exposición, son espacialmente muy variables, motivo por el cual, la radiación solar neta en un punto, es muy variable en el espacio y en el tiempo. Por ello, la escorrentía de deshielo cambia significativamente en ambas dimensiones. Esto nos indica que modelar la escorrentía de deshielo en cuencas de montaña es necesario distribuir espacialmente los diferentes puntos de estimación de la escorrentía de deshielo sobre toda la cuenca. La incorporación de un modelo de derretimiento de nieve distribuido en una cuenca y de modelos hidrológicos regionales, es crucial si nosotros vamos a entender y predecir cambios en el tiempo y la magnitud de la escorrentía en respuesta a los cambios climáticos.

Para entender la relación entre los procesos que controlan la acumulación y el derretimiento de la nieve, es fundamental desarrollar una capacidad de predicción y así describir la respuesta de una cuenca en los cambios de las entradas de agua y energía. Debido a que las cuencas de montaña poseen una alta pendiente y una topografía variada, se caracterizan por su alto grado de heterogeneidad en las importantes propiedades que controlan la acumulación de la nieve y el derretimiento y escorrentía de deshielo. En un informe reciente del «National Research Council» se da énfasis en que «...»uno de los principales obstáculos en la comprensión de los procesos superficiales, es la alta variabilidad espacial de los rasgos superficiales y las variables hidrológicas. Además, «...»el tema de la relación e integración de formulaciones a diferentes escalas no ha sido adecuadamente conducido. El hacerlo, permanece como uno de los desafíos más sobresalientes en el campo de los procesos superficiales». La hidrología de áreas cubiertas de nieve fue una de las áreas «críticas y emergentes» identificadas en el estudio para futuras investigaciones. La predicción más relevante del trabajo en esta proposición es: ¿Cómo puede una combinación de datos de sensores remotos en conjunto con los estudios de terreno producir la información más completa sobre la distribución de recursos nivales en las tasas del metamorfismo y del derretimiento?

nieve en cuencas de montaña?

La principal limitación en nuestro trabajo es la disponibilidad de buenos datos para la prueba y validación de los modelos, excepto en la cuenca experimental del Glaciar Echaurren, donde existen un conjunto de datos de buena calidad.

2.- OBJETIVOS

Los objetivos científicos de nuestro trabajo son:

- Desarrollar un modelo de balance de energía distribuido espacialmente de la escorrentía de deshielo adecuado para cuencas Andinas, basado en el cálculo de la radiación solar neta y variables meteorológicas sobre terrenos complejos.

Nota: En esta publicación se presenta sólo un modelo dividido por bandas de igual elevación y sin incluir la radiación. Sólo se usan índices de temperatura. El otro, está en proceso de desarrollo.

- Examinar y evaluar la capacidad de los modelos para pronosticar la escorrentía de deshielo, determinar las relaciones de pronóstico entre los factores climáticos, las propiedades del manto de nieve y el inicio del derretimiento.

- Hacer un análisis comprensivo de la sensibilidad del modelo a los errores de los parámetros y datos, como también, hacer la validación del modelo y contestarse algunas preguntas tales como:

- ¿Cuál es la distribución espacial de la profundidad de la nieve y el equivalente en agua de la misma en cuencas de montaña?

- ¿Cómo puede una combinación de datos de sensores remotos y estudios de terreno producir la más confiable medida de los recursos nivales?

- ¿Cuáles son las distribuciones espaciales y temporales de las tasas de metamorfismo y del derretimiento de la nieve sobre cuencas de montaña?

- ¿Cómo puede una combinación de datos de sensores remotos y mediciones micrometeorológicas locales proporcionar una entrada a modelos de balance de energía para calcular dichas tasas?

- ¿Cómo incorporar las áreas englacadas a este tipo de modelos?

3.- MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La unidad básica para los estudios de derretimiento de nieve e hidroquímicos es una pequeña cuenca de cabecera. Así proponemos examinar la cuenca del Glaciar Echaurren de 4.5 Km² por sí misma, y también como parte de la cuenca más grande de Laguna Negra, Embalse El Yeso y Río Maipo en el Manzano. En este trabajo se presentarán, por problemas de espacio, sólo algunos resultados, usando imágenes NOAA en la cuenca del Río Yeso en Embalse. Laguna Negra no cuenta con datos para la calibración y validación del modelo. Así se tendrán áreas anidadas, subiendo desde los puntos de medición de la cuenca pequeña a las cuencas de tamaño intermedio y, por último, a la cuenca principal.

La aproximación que estamos desarrollando en la hoya de la estación fluviométrica del estero Echaurren, se basa en el trabajo que se lleva a cabo en la cuenca de Emerald-lake, en la cuenca de cabecera de Sierra Nevada, California, con el conjunto de datos de más alta calidad disponible en la región. En nuestro caso se deberá incorporar la existencia de glaciares. Nuestras hipótesis son que una cuenca de montaña puede ser clasificada de acuerdo a un criterio físico en unidades de terreno. Esto disminuye el número de nodos donde el modelo de balance de masa y energía necesita ser corrido, mientras aún entregue una caracterización realista, y segundo, el número de unidades de terreno obtenidas es significativamente menor que el número de nodos de la grilla del modelo digital de elevación (MDE) usado para generar la clasificación.

- Los datos requeridos para esta aproximación incluyen:
- imágenes satelitales: variación de la cobertura nival;
 - radiación solar, viento, humedad relativa, temperatura del aire;
 - temperatura del suelo y de la nieve;
 - distribución de la profundidad de la nieve y su equivalente en agua;
 - un modelo digital de terreno (MDT) de 5 m. de resolución horizontal para la cuenca (1 a 2 metros en vertical); y
 - caudal de la cuenca.

4.- IMÁGENES SATELITALES

En la tabla 1, se muestran las características de distintos tipos de imágenes satelitales. DGA ha estado trabajando con imágenes NOAA, principalmente, con imágenes LANDSAT y con imágenes de radar: RADARSAT y SIR-C.

Los trabajos con imágenes NOAA se han estado realizando entre la DGA y el CPR de la UC, y con este mismo convenio, se está trabajando con imágenes RADARSAT, que están siendo entregadas para la temporada 97/98 (6 imágenes en total), a través del subconvenio entre la DGA y el CPR de la UC y la Oficina Estatal de Canadá: Canadian Center for Remote Sensing (CCRS). Finalmente con imágenes LANDSAT en el convenio de cooperación entre la DGA, la UAT y la UCSB.

Aquí, sólo se presentan los trabajos realizados con imágenes NOAA. En futuras publicaciones se mostrarán los resultados de RADARSAT, LANDSAT y SIR-C con aplicaciones en otros modelos nacionales e internacionales, como Peña y Nazarala, Sacramento, SNTHERM y modelos Canadienses, como una forma de comparar su aplicabilidad en cuencas Chilenas y cooperar con el modelo diseñado especialmente para ellas, en conjunto con la UAT y la UCSB, y la oficina Canadiense. Finalmente se compararán con aplicaciones de correlaciones simples y uso de componentes principales.

5.- RECOLECCIÓN DE DATOS DE TERRENO

Si bien la DGA posee tal vez el mejor conjunto de datos disponibles del Hemisferio Sur para probar los modelos de balance de energía en una cuenca de montaña, aún se requieren varios adelantos. Un balance de masa de agua es fundamental para nuestra aproximación de modelos y depende de mediciones exactas de:

- i) la profundidad de la nieve y la densidad en la acumulación máxima (equivalente en agua de nieve),
- ii) datos micrometeorológicos para establecer y modelar un balance de energía,
- iii) caudales de la cuenca, y
- iv) trabajar con softwares comunes y conectados a través de modem para poder efectuar modelaciones en forma paralela, y continuar los viajes para estrechar los contactos teóricos y mediciones en terreno.

De lo anterior, se desprende que la principal necesidad es la de un «data-logger». La segunda es usar métodos comunes para los estudios de terreno del equivalente en agua de la nieve. Los equipos requeridos para mejorar esta actividad son mínimos.

6.- APLICACIÓN DEL MODELO «SRM3_2» CON IMÁGENES NOAA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Se aplicó el modelo de simulación y pronóstico en la cuenca del Río Yeso en Embalse para las temporadas 1991/92 y 1993/94, usando los resultados de imágenes NOAA de (Rosenthal et al, 1997). También, se está aplicando en otras 12 cuencas y subcuencas del Mapocho y del Maipo, obteniéndose en la mayoría, resultados bastante alentadores.

En la tabla 2, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en este estudio para el Embalse el Yeso, en las formas de simulación y pronóstico a nivel diario. También, se muestra los indicadores de los valores obtenidos a nivel mensual que, en general, son bastante buenos, a excepción del mes de noviembre, el cual habrá que estudiar las razones de estas diferencias. Para la temporada de 1993/94, También se produce una variación importante en el mes de octubre.

En resumen, en el modo de simulación, para ambas temporadas en el Embalse el Yeso, se obtiene a nivel diario un coeficiente de correlación $R = 0.95$. Para el modo de pronóstico, se obtuvo un coeficiente de correlación de $R = 0.87$ para la temporada 1991/92 y $R = 0.82$ para 1993/94, y a nivel mensual de los 13 meses se tienen 8 valores entre 0 y 10%, 1 entre 10 y 20% y 4 mayores de 20%. En octubre se obtuvo un valor mayor de 50% y noviembre 2 valores mayores al 50%, lo que habrá que revisar.

En la figura 1 se muestra en forma gráfica los caudales registrados y simulados.

En la figura 2 se muestra el Modelo Digital de Terreno de la cuenca del estero Echaurren efectuada con el SIG ARC-INFO.

7.- CONCLUSIONES

Los valores presentados en la tabla 2 y otros que se están obteniendo en las 12 cuencas y subcuencas de los Ríos Maipo y Mapocho, avalan la efectividad del uso del modelo S.R.M. que tiene como principal índice la temperatura media diaria. El uso de este modelo también arroja buenos resultados como predictor a largo, mediano y corto plazo, usando las temperaturas medias quincenales esperadas durante la temporada de deshielo y una precipitación diaria igual a 0.

Reconocimientos

Se usó la variación de la cobertura nival presentada en (Rosenthal et al 1997). El Cartógrafo(e) Sr. Guillermo Tapia participó en la edición del informe.

REFERENCIAS

- «Opportunities in the Hydrologic Sciences.» National Academy Press, Washington: National Research Council, 1991.
- BALES, R. C., K. Elder, And R. Galágarra-Sánchez, «Distributed approach to modeling snowmelt runoff in alpine catchments,» in Proceeding, Workshop on Water Resources and Global Change, pp. 207-217, Tsukuba, Japan: Public Works Research Institute, Feb 3-6, 1992.
- DOZIER, J., and J. FREW, «Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data,» IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28, no. 5, pp. 963-969, 1990.
- DIBAYAH, R., J. DOZIER, and F. W. DAVIS, «Topographic distribution of clear-sky radiation over the Konza Prairie, Kansas,» Water Resources Research, vol. 26, no. 4, pp. 679-690, 1990.

TABLA 1.- POSIBILIDADES DE SENSORES REMOTOS PARA DETERMINAR MAPAS DE COBERTURA NIVAL Y TAMAÑO DE CUENCAS.

TIPO DE IMAGEN	RESOLUCION SPACIAL	TAMAÑO MINIMO DE LA CUENCA	FRECUENCIA
ORTOFOTO AREA	3 m.	1 Km2	FLEXIBLE
LANDSAT	80 m.	10 - 20 Km2	16 - 18 DIAS
MSS	30 m.	2.5 - 5 Km2	
TM			
NOAA AVHRR	1.1 Km	100 - 500 Km2	12 HRS.
METEOSAT Visible	2.5 Km	500 - 1000 Km2	30 MIN.
SPOT	10 - 20 m.	2 - 3 Km2	26 DIAS
MOS	50 m.	5 - 10 Km2	17 DIAS
SIR-C	15 m.	2 Km2	MISIONES
RADARSAT	30(*) y OTROS	2.5 Km2	24 DIAS (*)

- MSS : Multiple Spectral Scanner (USA)
- TM : Thematic Mapper (USA)
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
- AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer (USA)
- SPOT : System Probatoire d' Observation de la terre (Francia)
- MOS : Marine Observation Satellite (Japon)
- SIR-C : Spaceborne Imaging Radar - C (USA)
- RADARSAT : Radar Satellite (Canada). (*), modo estandar que es el que está usando la DGA.

TABLA 2.- RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MODELO «SRM».

CUENCA	AREA TOTAL Km2	RANGO ALTITUD M.S.N.M.	Nº DE BANDAS	AÑOS	R	R2	DV %
SIMULACION:							
-ECHAURREN *	4.5	3000-4200	1	85/86	0.92	0.84	-7.5
-EL YESO **	350	2475-6550	3	91/92	0.95	0.91	2.8
-EL YESO **	350	2475-6550	3	93/94	0.95	0.91	2.5
-ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	2900	900-6100	3	87/88	0.95	0.91	-0.9
-MAIPO EN EL MANZANO	4960	850-6550	3	88/89	0.79	0.62	-0.7
-EL MANZANO	4960	850-6550	3	82/83	0.95	0.91	3.4
-MAPOCHO EN LOS ALMEDROS	630	1024-4800	3	87/88	0.65	0.42	29.9
-TINGUIRICA BAJO BRIONES	1460	520-4500	3	87/88	0.94	0.88	-0.3
PRONOSTICO:							
- EL YESO **	350	2475-6550	3	91/92	0.87	0.75	7.2
- EL YESO **	350	2475-6550	3	93/94	0.82	0.68	19.2

* Resultados obtenidos en (Escobar, F. et al 1997)
 ** Resultados obtenidos en este estudio.
 - Los demás resultados fueron obtenidos en (Escobar, F., 1992).

Figura 1

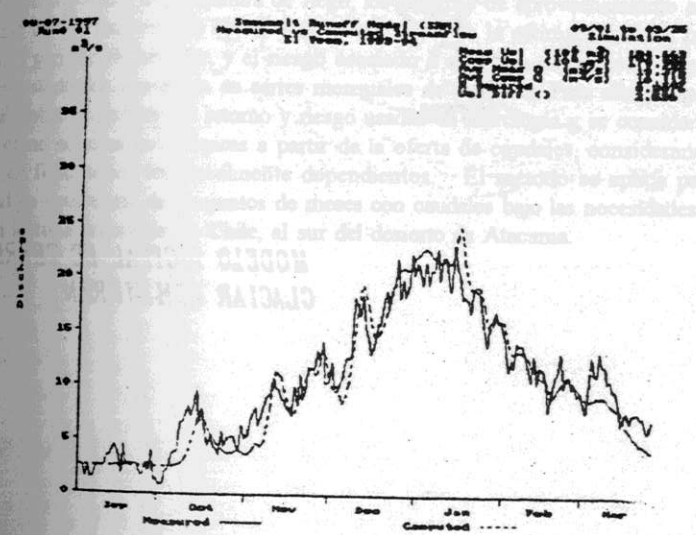
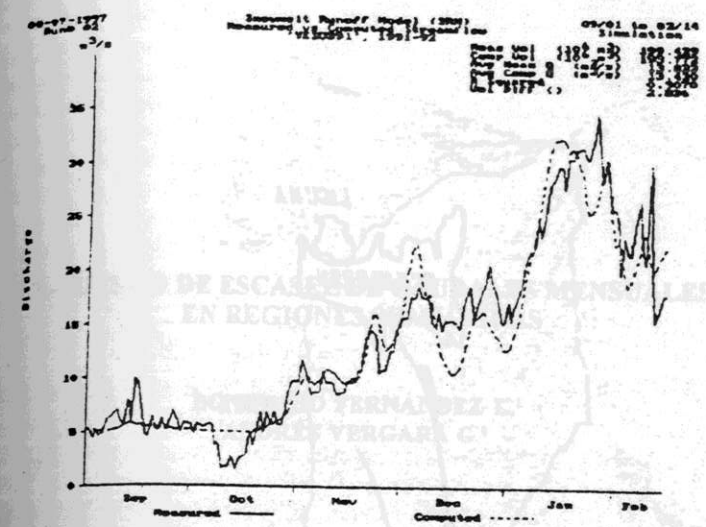
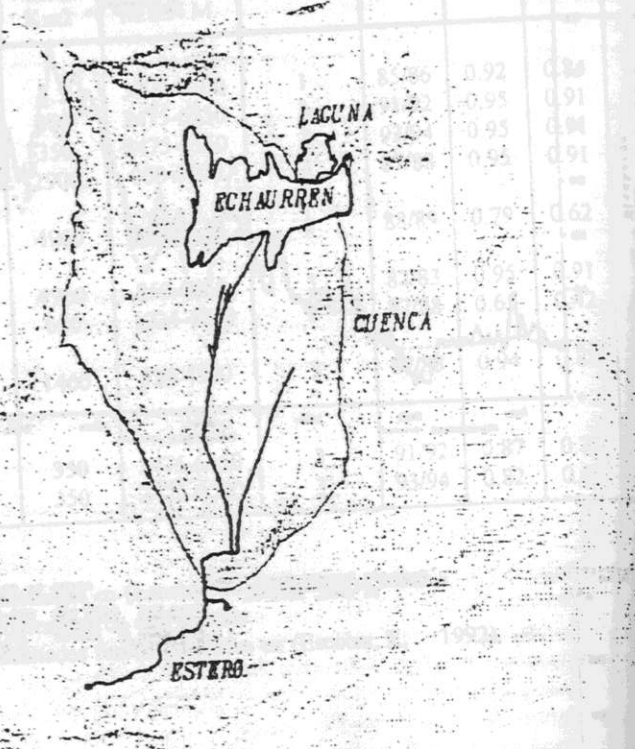


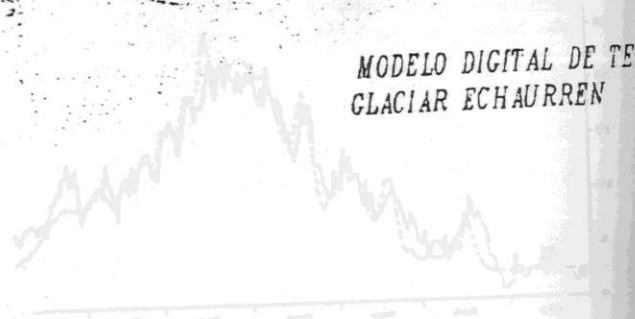
Figura 2

Tabla 1. Resultados obtenidos con el modelo SRM6

CUENCA	ESTADO	R	...
SIMULACION		0.92	0.98
-ECHAURREN		0.95	0.91
-EL YESO		0.95	0.94
-EL YESO		0.95	0.91
-ACONCAGUA			
-CHALIBUQUITO		0.78	0.62
-MAYO EN EL			
-MAYO EN EL			0.91
-EL MARGANO			0.97
-BOCHO EN LOS			0.64
-AGUIRRE			
-TUTUPURCA			
-BARRANCO			
-EL YESO			
-EL YESO			



MODELO DIGITAL DE TERRENO
GLACIAR ECHAURREN



2.2.- RIESGO DE ESCASEZ DE CAUDALES MENSUALES
EN REGIONES SEMIÁRIDAS

BONIFACIO FERNÁNDEZ L.¹
ANDRÉS VERGARA G.¹

RESUMEN

En regiones semiáridas es frecuente que se presenten periodos de uno o varios meses consecutivos con escasez de precipitaciones o con caudales bajos en los ríos, los que tienen importantes efectos sobre la agricultura de riego, los sistemas de aprovechamiento en general, o la flora y fauna de los cauces. El objetivo de este artículo es la estimación de la probabilidad de ocurrencia, o periodo de retorno, y el riesgo asociado a este tipo de eventos, disponiendo de la formación estadística contenida en series mensuales de caudales. Para ello se aplican las ideas adicionales sobre el periodo de retorno y riesgo usadas en hidrología y se consideran los eventos de interés como sequías hidrológicas a partir de la oferta de caudales, considerando situaciones periódicas de fenómenos temporalmente dependientes. El método se aplica para calcular la probabilidad de ocurrencia de conjuntos de meses con caudales bajo las necesidades ecológicas de los ríos, en la zona semiárida de Chile, al sur del desierto de Atacama.

¹ Depto. de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile.