

Anexo 3. Frecuencias relativas de las CAH-serie Precipitaciones Máx. Anuales en 72 Hrs

Nº	CUENCA	ESTACION	LATITUD SUR	Nº AÑOS	ESTACION INACTIVA M AYO-AGOSTO			ESTACION CRECIMIENTO SEPTIEMBRE-ABRIL		
					I <12.7	II 12.7-28	III >28	I <35.6	II 35.6-53.5	III >53.5
1	ELQUI	EMBALSE LA LAGUNA	30.20	32	84.8%	6.1%	9.1%	100.0%	0.0%	0.0%
2	LIMARI	HURTADO	30.28	26	85.2%	11.1%	3.7%	100.0%	0.0%	0.0%
3	LIMARI	PICHASCA	30.38	27	92.9%	3.6%	3.6%	100.0%	0.0%	0.0%
4	LIMARI	SAMOA	30.40	18	94.4%	5.6%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
5	LIMARI	EMBALSE RECOLETA	30.50	27	96.4%	3.6%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
6	LIMARI	RAPEL	30.72	27	89.3%	10.7%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
7	LIMARI	EL TOME	30.82	27	89.3%	7.1%	3.6%	100.0%	0.0%	0.0%
8	LIMARI	PEDREGAL	30.85	18	89.5%	0.0%	10.5%	100.0%	0.0%	0.0%
9	LIMARI	CAREN	30.85	27	85.7%	7.1%	7.1%	100.0%	0.0%	0.0%
10	LIMARI	TASCADERO	31.02	27	84.6%	7.7%	7.7%	100.0%	0.0%	0.0%
11	LIMARI	TULAHUEN	31.02	27	85.7%	3.6%	10.7%	100.0%	0.0%	0.0%
12	LIMARI	COMBARBALA	31.02	20	81.0%	14.3%	4.8%	100.0%	0.0%	0.0%
13	LIMARI	LAS RAMADAS	31.03	27	85.7%	7.1%	7.1%	100.0%	0.0%	0.0%
14	LIMARI	COGOTI 18	31.08	27	82.1%	7.1%	10.7%	100.0%	0.0%	0.0%
15	CHOAPA	SANTA VIRGINIA	31.55	27	92.3%	0.0%	7.7%	100.0%	0.0%	0.0%
16	CHOAPA	HACIENDA HUINTIL	31.57	30	86.7%	6.7%	6.7%	100.0%	0.0%	0.0%
17	CHOAPA	MINCHA NORTE	31.58	20	85.7%	9.5%	4.8%	100.0%	0.0%	0.0%
18	CHOAPA	ILLAPEL DGA	31.63	20	81.0%	9.5%	9.5%	100.0%	0.0%	0.0%
19	CHOAPA	SAN AGUSTIN	31.72	36	86.5%	5.4%	8.1%	100.0%	0.0%	0.0%
20	CHOAPA	LIMAHUIDA	31.75	30	86.7%	3.3%	10.0%	100.0%	0.0%	0.0%
21	CHOAPA	MAL PASO	31.75	27	85.2%	3.7%	11.1%	100.0%	0.0%	0.0%
22	CHOAPA	SALAMANCA	31.77	20	76.2%	4.8%	19.0%	100.0%	0.0%	0.0%
23	CHOAPA	CUNCUMEN	31.90	35	80.6%	6.5%	12.9%	100.0%	0.0%	0.0%
24	CHOAPA	LA TRANQUILLA	31.90	28	79.3%	10.3%	10.3%	100.0%	0.0%	0.0%
25	CHOAPA	COIRON	31.90	20	76.2%	9.5%	14.3%	100.0%	0.0%	0.0%
26	QUILIMARI	EL NARANJO	32.03	11	83.3%	0.0%	16.7%	100.0%	0.0%	0.0%
27	QUILIMARI	EMBALSE CULIMO	32.07	22	77.3%	0.0%	22.7%	100.0%	0.0%	0.0%
28	QUILIMARI	INFIERNILLO	32.07	11	66.7%	8.3%	25.0%	100.0%	0.0%	0.0%
29	QUILIMARI	QUEBRADA SECA	32.07	12	69.2%	0.0%	30.8%	100.0%	0.0%	0.0%
30	QUILIMARI	LOS CONDORES	32.12	17	75.0%	12.5%	12.5%	100.0%	0.0%	0.0%
31	QUILIMARI	QUELON	32.15	21	72.7%	18.2%	9.1%	100.0%	0.0%	0.0%
32	QUILIMARI	QUEBRADA EL MANZANO	32.18	11	66.7%	0.0%	33.3%	100.0%	0.0%	0.0%
33	PETORCA	CHINCOLCO	32.22	19	89.5%	10.5%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
34	PETORCA	HACIENDA EL SOBRANTE	32.23	36	82.9%	5.7%	11.4%	100.0%	0.0%	0.0%
35	ACONCAGUA	LOS ANDES	32.83	21	52.4%	33.3%	14.3%	100.0%	0.0%	0.0%
36	ACONCAGUA	VILCUYA	32.87	28	72.4%	6.9%	20.7%	100.0%	0.0%	0.0%
37	ACONCAGUA	RIECILLOS	32.93	29	60.0%	16.7%	23.3%	100.0%	0.0%	0.0%
38	MAIPO	SAN GABRIEL	33.78	13	30.8%	7.7%	61.5%	100.0%	0.0%	0.0%
39	MAIPO	LAS MELOSAS	33.90	17	37.5%	25.0%	37.5%	93.8%	0.0%	6.3%
40	CLARO-RAPEL	CENTRAL LAS NIEVES	34.48	22	42.1%	15.8%	42.1%	100.0%	0.0%	0.0%
41	TINGUIRIRICA-RA	SAN FERNANDO	34.58	20	35.0%	15.0%	50.0%	100.0%	0.0%	0.0%
42	TINGUIRIRICA-RA	LA RUFINA	34.73	42	40.5%	11.9%	47.6%	92.9%	7.1%	0.0%
43	MATAQUITO	CURICO	34.98	20	40.0%	35.0%	25.0%	100.0%	0.0%	0.0%
44	MATAQUITO	LOS QUEÑES	35.00	34	38.2%	11.8%	50.0%	82.4%	8.8%	8.8%
45	MATAQUITO	LONTUE	35.03	22	58.8%	11.8%	29.4%	100.0%	0.0%	0.0%
46	MATAQUITO	POTRERO GRANDE	35.20	28	53.6%	14.3%	32.1%	96.4%	3.6%	0.0%
48	MAULE	EL GUINDO	35.27	35	48.6%	22.9%	28.6%	100.0%	0.0%	0.0%
51	MAULE	HUAPI	35.58	29	36.7%	6.7%	56.7%	93.3%	3.3%	3.3%
52	MAULE	COLORADO	35.62	35	25.0%	27.8%	47.2%	97.2%	0.0%	2.8%
53	MAULE	ARMERILLO	35.70	35	37.1%	11.4%	51.4%	91.4%	5.7%	2.9%
54	MAULE	EMBALSE ANCOA	35.90	37	27.0%	8.1%	64.9%	94.6%	0.0%	5.4%
57	MAULE	BULLILEO	36.28	37	24.3%	10.8%	64.9%	91.9%	0.0%	8.1%
58	ITATA	DIGULLIN	36.87	29	20.0%	10.0%	70.0%	90.0%	6.7%	3.3%
59	IMPERIAL	LUMACO	38.15	48	35.4%	16.7%	47.9%	95.8%	2.1%	2.1%
60	IMPERIAL	PUERTO NUEVO	38.73	43	30.2%	23.3%	46.5%	95.3%	4.7%	0.0%
62	TOLTEN	VILLARRICA	39.28	34	8.8%	5.9%	85.3%	67.6%	17.6%	14.7%
63	CUENCAS E ISLAS	PUERTO MONTT	41.45	24	19.0%	14.3%	66.7%	81.0%	19.0%	0.0%

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

MODELACIÓN DEL ÁREA CUBIERTA DE NIEVE CON AUTÓMATAS CELULARES

BÁRBARA ORELLANA BOBADILLA¹
BONIFACIO FERNÁNDEZ LARRAÑAGA²

RESUMEN

Predecir y entender la variabilidad espacio temporal de la nieve es clave en la hidrología de cuencas de montaña, debido a que generalmente ella es responsable de los máximos caudales anuales. La cobertura nival representa la distribución espacial de la nieve, y por lo tanto de todas las variables que le están relacionadas. Sin embargo, por lo general se cuenta con información puntual, por lo que no se dispone de patrones y/o promedios espaciales representativos.

El presente estudio modela el área cubierta de nieve durante la temporada de deshielo, mediante Autómatas Celulares con reglas de transición totalísticas, probabilísticas, y no homogéneas, considerando relaciones empíricas del fenómeno en función de la elevación del terreno. La zona de estudio corresponde a la cuenca del río Maule, donde se cuenta con imágenes satelitales del área nival.

Se efectúan simulaciones con lo que se obtienen planos de probabilidad promedio de nieve, los que se comparan con la información disponible. De esta forma el procedimiento planteado permite conocer la probabilidad promedio espacial de la nieve durante la temporada de deshielo.

¹ Alumna de Magíster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

² Profesor, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de acumulación y derretimiento de nieve en cuencas de montaña se traducen en un comportamiento complejo, tanto espacial como temporal, del área cubierta de nieve (ACN). Debido a los últimos avances en percepción remota y a los sistemas de observación satelital con que se dispone, es posible observar esta variable y emplearla en sistemas de pronóstico de aportes de deshielo. El objetivo de este estudio es modelar el ACN en cuencas de montaña utilizando Autómatas Celulares.

Los Autómatas Celulares son herramientas matemáticas capaces de simular fenómenos complejos a través de relaciones sencillas (Schatten, 1997), incluyendo la perspectiva espacial y temporal del problema a considerar.

Se analiza la distribución del ACN durante la temporada de derretimiento en la cuenca del río Maule, en función de probabilidades empíricas de existencia de nieve en relación a la elevación del terreno, comparando el efecto de considerar o no la dependencia espacial del fenómeno.

2. PROCESO NIVAL

La distribución de la cobertura nival en cuencas montañosas es un fenómeno complejo, que varía considerablemente, tanto espacial como temporalmente, y que depende principalmente de las características topográficas (elevación, pendiente y aspecto), del tipo de vegetación, rugosidad de la superficie, radiación neta, intercambio de energía y de la redistribución de la nieve (Baron, 1992; Barros y Lettenmaier, 1993; Becker et al., 1994; Cline, 1995; Elder et al., 1991).

Para analizar y modelar el ACN a lo largo del año es necesario considerar los fenómenos de acumulación y fusión o derretimiento. En el primero, el ACN está determinada por la temperatura y la precipitación, variables fuertemente correlacionadas con la elevación, sin embargo, es necesario considerar efectos orográficos de la zona, así como también la redistribución de la nieve producida por el viento y la pendiente (Elder et al., 1991; Gray, 1979; Hartman et al., 1999). El derretimiento nival depende principalmente de la radiación neta (Zuzel y Cox, 1975), la que tiene una gran variabilidad espacial en zonas montañosas (Elder et al., 1991; Marks y Dozier, 1992), y de algunos aspectos fisiográficos de la zona, tales como pendiente, aspecto, latitud y horizontes locales (Elder et al., 1991).

Si se considera una modelación a escala local o mediana, es decir, dimensiones desde 100 m a 1 km, las principales variables que determinan el ACN son la topografía (elevación, pendiente y aspecto), el tipo de vegetación existente, la redistribución de la nieve y la radiación neta (Maidment, 1993; Gray y Prowse, 1993). La mayoría de los últimos estudios considera la elevación como el factor más importante en la distribución del ACN (Elder et al., 1991).

El presente estudio considera la elevación del terreno. Debido a la variabilidad espacial de esta variable, es necesario caracterizar la zona a estudiar a través de un modelo digital de terreno (MDT), el que consiste en la representación del área mediante una grilla con valores de elevación promedio en cada una de sus unidades básicas. El MDT es una fuente de información esencial en el análisis de la variabilidad espacial de procesos hidrológicos determinados por características morfológicas de la cuenca, pues facilita la incorporación de información adicional y además otorga rapidez en la obtención y análisis de información topográfica (área, elevación, pendiente y aspecto). Por otro lado, el MDT es una herramienta ideal para agrupar el área de interés en

zonas de similares características en relación a las variables a considerar en la modelación, por ejemplo, bandas de elevación.

Para un óptimo manejo y análisis de la información contenida en el MDT es conveniente la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG), los que consisten en sistemas de computación asistida, orientados a recolectar, almacenar, analizar y representar información geográfica. En este caso se utiliza el software Arcview versión 3.1.

3. ZONA DE ESTUDIO

El estudio se concentra en la cuenca alta del río Maule situada en la VII Región, encuadrada entre las latitudes $35^{\circ}30'$ y $36^{\circ}30'$ Sur, y longitudes $70^{\circ}18'$ y $71^{\circ}21'$, la que cubre una extensión aproximada de 5600 km². La cuenca presenta un marcado relieve topográfico desarrollado entre las altas cumbres que sobrepasan los 3000 m de elevación en el límite fronterizo de Chile con Argentina, hasta los 400 m de elevación en su límite occidental, con un recorrido de Este a Oeste del orden de 100 km.

La zona presenta seis meses lluviosos, la temporada invernal, desde mediados de Abril hasta principios de Octubre, mientras que en los meses de verano, Enero, Febrero y Marzo, casi no se producen precipitaciones.

Debido a estudios previos efectuados desde 1997 por Colorado State University y la Pontificia Universidad Católica de Chile, la zona de interés ya cuenta con un MDT en lenguaje ARC/INFO, con resolución de 30 m. Este modelo fue transformado por Trípodí, 2000, a lenguaje ERICDRIS a una resolución de 250 m. En este estudio se trabaja en Arcview con el modelo correspondiente a esta última resolución espacial.

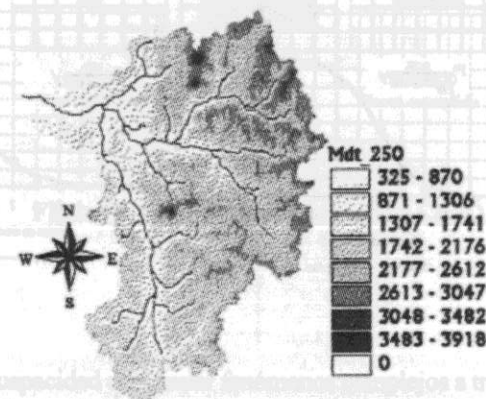


Figura 1. MDT cuenca del Maule.

Además, producto del mismo estudio antes mencionado, se cuenta con imágenes satelitales durante la temporada de deshielo desde los años 1988 hasta 1997, que ya han sido procesadas para la obtención de información de ACN. Dichas imágenes al georreferenciarse en relación con el MDT a trabajar otorgan información de probabilidad de nieve, valores entre 1 y 0, para cada una de las unidades básicas del MDT.

Análisis de elevación

Se subdividió la cuenca del río Maule en bandas de elevación de 250 m de altura, desde los 1000 hasta los 4000 m, con lo que se analizó la información satelital nival disponible. Esto consistió en agrupar todas las imágenes por mes y separar sus datos en relación a dichas bandas de elevación,

eliminando en cada uno de estos grupos los valores que se alejaban más de tres desviaciones estándar del promedio, con lo que se obtiene una muestra por banda por mes, en la que se calcula el promedio como medida de tendencia central. Este valor representa la probabilidad promedio de que haya nieve en una determinada banda para un determinado mes.

A los valores obtenidos se les ajustó una curva sigmoideal debido a que, físicamente, en la etapa de derretimiento se espera un comportamiento convexo a bajas elevaciones seguido por una relación mas o menos lineal de decaimiento de nieve y terminando con una curva cóncava, la que homogeneiza el comportamiento a altas elevaciones.

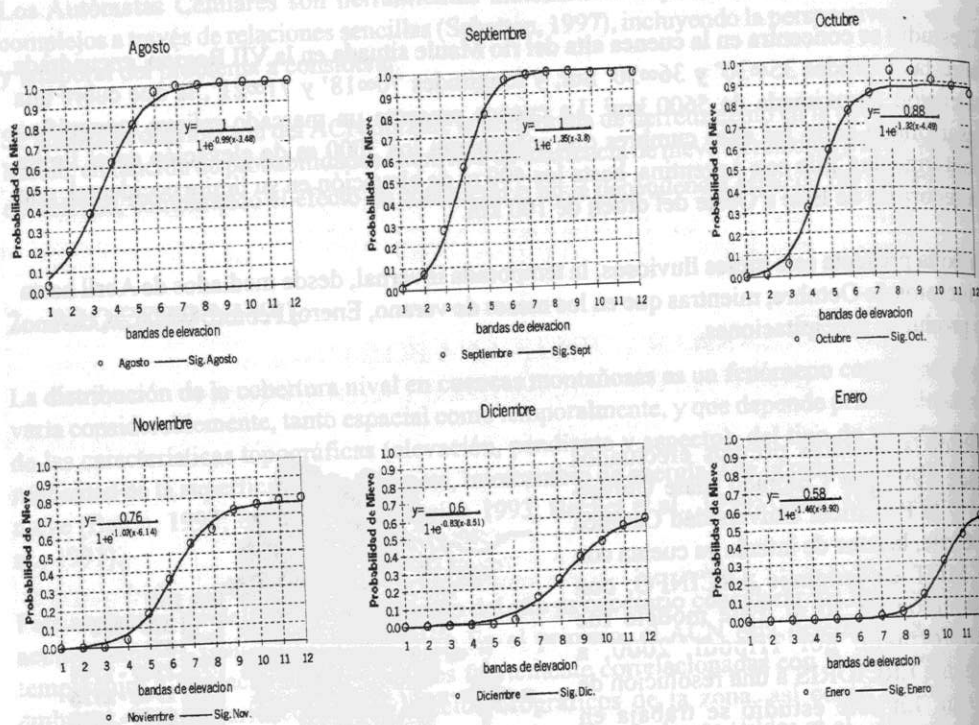


Figura 2. Probabilidad de Nieve en relación con bandas de elevación cada 250 m. de altura en la cuenca del río Maule, desde los 1000 m. hasta los 4000 m.

Se puede observar que las zonas de bajas elevaciones se derriten mas rápido que las de altas elevaciones. Sobre los 2750 m, banda 7, existen altas probabilidades de nieve hasta el mes de Noviembre mientras que a alturas bajo los 1250 m, banda 2, casi nunca hay nieve.

4. MÉTODO DE MODELACIÓN

Los Autómatas Celulares (ACs) son modelos matemáticos discretos, capaces de simular fenómenos dinámicos complejos, cuya evolución está determinada completamente por relaciones locales (Von Neuman, 1966), con lo que son el complemento científico computacional al concepto físico de campo, ya que pueden ser pensados como un tipo de diseño de éste, donde el espacio está representado por una grilla uniforme, siendo la celda su unidad básica, y el tiempo es considerado en intervalos discretos (Toffoli and Margolus, 1987).

En general, los ACs pueden definirse a través de seis elementos básicos: celda, grilla, estados, tiempo, reglas de transición y vecindario (Pizarro, 1999). La celda es el lugar que posee un estado determinado para un instante de tiempo, y en sí representa un lugar espacial del fenómeno. El caso más simple es cuando ella adquiere estados binarios (0-1, vivo o muerto), pero en modelos con mayor complejidad puede presentar más estados, pero siempre dentro de un conjunto finito de posibilidades. Las celdas son todas idénticas y se distribuyen en un espacio n-dimensional discreto en el cual operan los ACs; n puede ser 1, 2 ó 3.

El tiempo es discreto y sirve como índice en la configuración sucesiva de simulaciones. Es también homogéneo, con lo que todas las celdas cambian de estado al unísono.

Las reglas de transición definen la evolución del sistema, y éstas son locales y uniformes. Locales quiere decir que ellas definen el estado de la celda en el tiempo $t+1$ basadas solamente en el estado de ésta y su vecindario en el instante t . Que sean uniforme quiere decir que las reglas son las mismas en cualquier lugar, con excepción de los bordes de la grilla donde pueden existir reglas especiales. Por otro lado, estas reglas pueden ser determinísticas, probabilísticas o estocásticas, dependiendo de cómo se relacione el estado entre los tiempos.

El vecindario puede ser definido de muchas formas pues representa el radio de influencia en la celda, es decir, determinará la correlación espacial del fenómeno a modelar. En la Figura 3 se muestran tres vecindarios definidos para ACs bidimensionales, el color gris claro representa la celda central mientras que las celdas gris oscuro el vecindario respectivo.

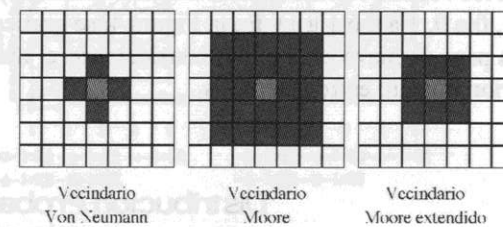


Figura 3. Algunos vecindarios de ACs 2D.

La principal característica de los ACs es su capacidad de simular fenómenos complejos a través de comportamientos simples, es decir, siguiendo reglas simples (Schatten, 1997). Debido a su simplicidad matemática y a la tecnología computacional alcanzada en la última década, esta herramienta matemática ha empezado a ser utilizada para representar fenómenos de transferencia de calor, difusión, dinámica de fluidos, propagación de incendios forestales y crecimiento urbano, entre otros (Gonçalves, 1994; Clarke et al., 1995, 1998).

Si se considera la evolución del ACN mediante reglas de transición probabilísticas, es posible establecer, mediante diversas simulaciones, la probabilidad de presentar nieve o no para cada instante de tiempo a considerar en cada una de las unidades básicas del MDT de la cuenca.

En nuestro caso la celda corresponde a un área cuadrada de 250^2 m², debido a la resolución espacial del MDT y de las imágenes satelitales, siendo la dimensión de la grilla 2-D. El vecindario elegido es el de Von Neumann y se consideran sólo estados binarios, es decir, con nieve (1) o sin nieve (0). El tiempo es mensual y se consideran los meses correspondientes a la temporada de deshielo, es decir, desde agosto hasta enero. Para definir las reglas de transición a utilizar se realizó un análisis de vecinos con la información satelital disponible, el que consiste en encontrar probabilidades empíricas de cambio de estado mensuales, es decir, el cambio de estado,

de nieve a nieve, o nieve a no nieve, en función de la existencia de nieve en el vecindario a lo largo del tiempo a considerar.

Análisis de vecinos

Los ACs definen el estado de una celda en un determinado tiempo considerando el estado de ésta y el de sus celdas vecinas en el tiempo anterior. Para ello, es necesario averiguar la relación que existe entre los estados del sistema en un instante $t-1$ y el instante t en un año tipo, en función de las imágenes de ACN. Con esto se quiere responder la pregunta: "Dado que yo y mis vecinos tenemos un cierto estado en el tiempo t , ¿puedo determinar con esta información el estado que tendré en el tiempo $t+1$?"

Se selecciona la información correspondiente a Agosto y Septiembre del año 1991 y desde Octubre a Noviembre del año 1994, y se calculan las probabilidades de cambio de estado en relación a los estados de la celda central y su vecindario en el tiempo $t-1$, y el de la celda central en el tiempo t . Como se consideran tiempos mensuales desde Agosto hasta Enero, existen cinco cambios de estado temporales. Dado que el vecindario escogido es el de Von Neumann y se consideran sólo dos estados posibles (0 = no nieve y 1 = nieve), existen 20 configuraciones posibles para cada cambio temporal, cinco en relación con el vecindario (desde todos los vecinos con nieve hasta ninguno con nieve) y cuatro para la celda principal (pasar de 0 a 1, 0 a 0, 1 a 0 ó 1 a 1). En la Figura 4, se grafica las probabilidades obtenidas cuando la celda pasa de nieve a no nieve, considerando el número de vecinos con nieve en el tiempo anterior, número entre paréntesis.

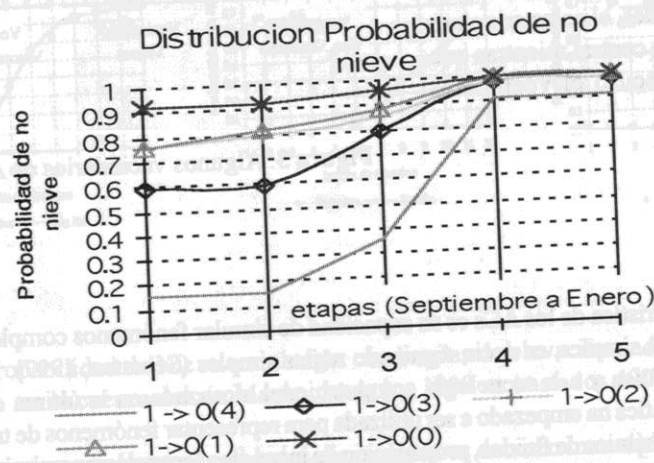


Figura 4. Probabilidades empíricas de cambio de estado de nieve a no nieve en relación con la existencia de nieve en el vecindario, temporada de deshielo, cuenca del río Maule.

Si se observan los resultados anteriores, las probabilidades de cambio de estado son no estacionarias y varían también dependiendo cuán rodeada de nieve está cada celda en relación con su vecindario. Para las situaciones de dos o un vecino con nieve, no hay grandes diferencias y a medida que el número de vecinos con nieve disminuye, las probabilidades de pasar de nieve a no nieve adquieren menor variabilidad temporal.

Se encuentra conveniente relacionar las probabilidades de cambio de estado con la elevación del terreno, por lo que se realiza un análisis idéntico al anterior pero considerando además las bandas

de elevación del análisis de la cuenca. Los resultados obtenidos considerando el cambio de nieve a no nieve, y el número de vecinos con nieve, se ilustran en la Figura 5, donde se agruparon las bandas que no presentaban variaciones en las probabilidades obtenidas.

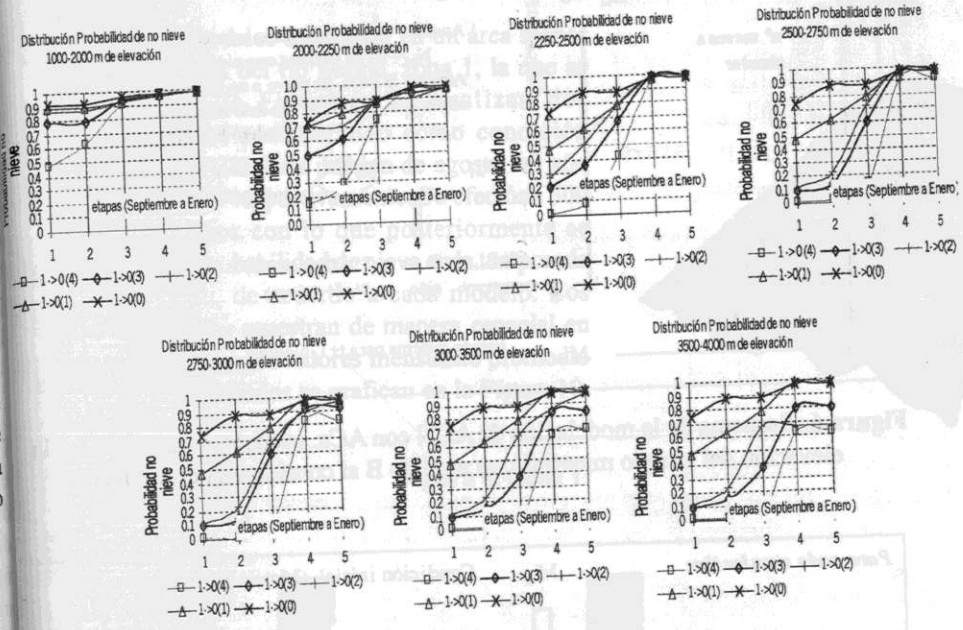


Figura 5. Probabilidades empíricas de cambio de estado de nieve a no nieve en relación con la existencia de nieve en el vecindario considerando la elevación del terreno.

Se proponen tres modelos, dos de ellos basados en ACs. El modelo A utiliza como reglas de transición las probabilidades empíricas de cambio de estado que no consideran el efecto de la elevación, Figura 4, al ser estas probabilidades dependientes del número de vecinos con nieve, al importar la ubicación de ellos, son totalísticas. El modelo B considera las probabilidades empíricas de cambio de estado que dependen de la elevación, Figura 5, con lo que las reglas de transición además de ser totalísticas, son no homogéneas, pues no son las mismas en toda la grilla ya que dependen de la elevación de la celda. El modelo C se desarrolla para determinar la utilización de ACs en la modelación aporta ventajas. Para ello se determina el estado de cada celda en el tiempo siguiente, en función sólo de la elevación del terreno, sin considerar el estado de las celdas vecinas, es decir, utilizando las probabilidades empíricas de nieve obtenidas en el análisis de elevación descrito previamente.

La forma de implementar los modelos se ilustra en las Figuras 6 y 7. A partir del estado primario del sistema para un determinado mes, la condición inicial, se estima el estado para el mes siguiente en los lugares que presentan nieve, considerando la probabilidad de cambio de estado temporal para cada modelo. Al ser las condiciones probabilísticas, para determinar si hay o no hay nieve en el tiempo siguiente, es necesario decidir en función a números aleatorios uniformes, a generar. Se asume que los lugares sin nieve van a seguir sin nieve, es decir, que en la temporada de deshielo no ocurrirán tormentas tardías.

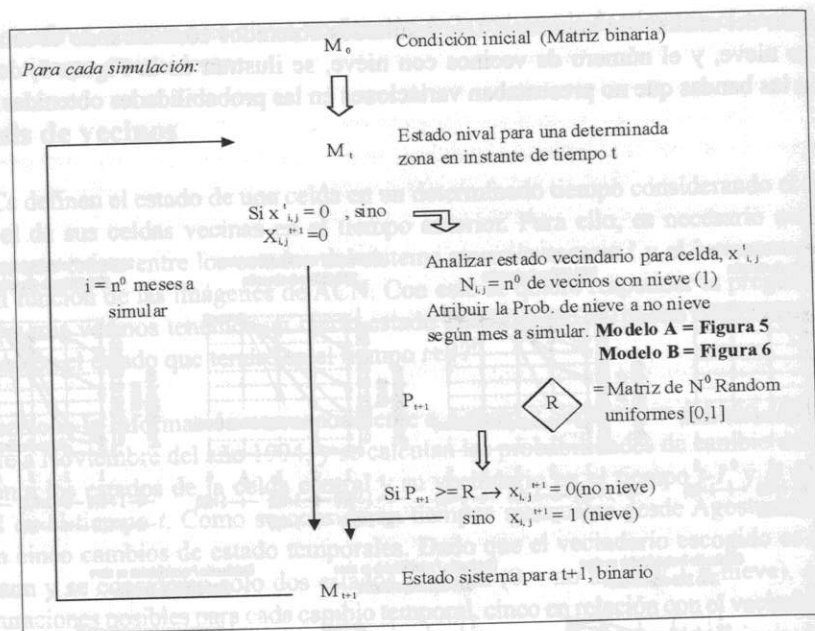


Figura 6. Esquema de la modelación de ACN con ACs. Modelo A no considera la elevación del terreno mientras que modelo B sí considera la elevación.

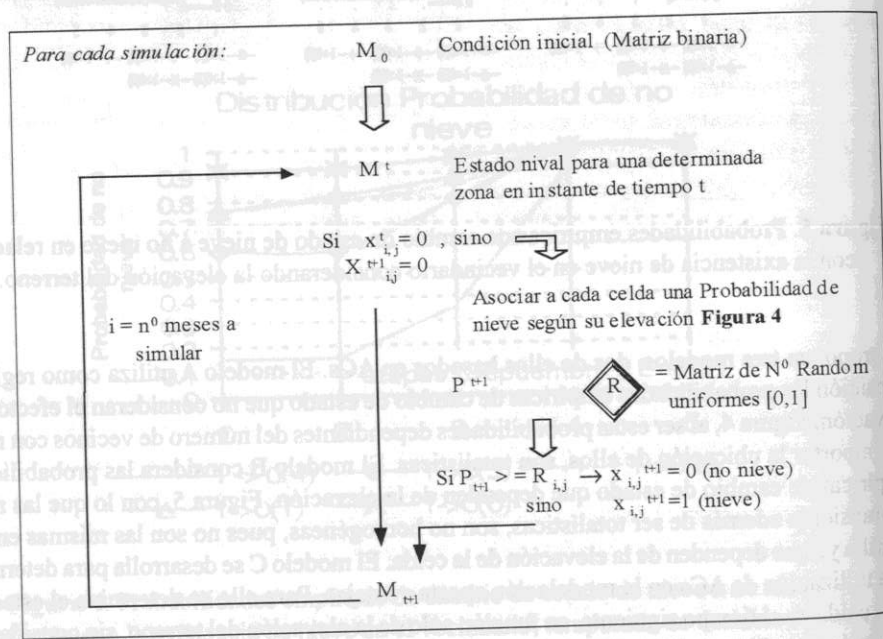


Figura 7. Esquema de la modelación de ACN considerando la elevación del terreno, modelo C.

Para obtener el ACN mensual, con cada uno de los modelos, es necesario efectuar n simulaciones a partir de la misma condición inicial. De esta forma se tiene para cada mes n estados binarios del sistema, a partir de los cuales se calcula la probabilidad de nieve como la razón entre casos posibles y casos totales para cada celda en cada instante de tiempo, obteniéndose planos mensuales de probabilidad promedio de nieve en la temporada de deshielo del año

correspondiente a la condición inicial. Esta probabilidad promedio mensual de existencia de nieve en cada una de las unidades del MDT de la zona a considerar es equivalente al porcentaje promedio de ACN que se presenta en cada celda.

5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los tres modelos se aplican en un área menor de la cuenca del río Maule, zona 1, la que se indica en la Figura 8. Se analizan dos situaciones, considerando como condición inicial el ACN de la imagen de agosto del año 1991 y 1996 respectivamente. Se efectúan 500 simulaciones con lo que posteriormente se calcula la probabilidad de nieve en la temporada de deshielo de acuerdo a cada modelo. Los resultados se muestran de manera espacial en la Figura 9, y los valores mensuales promedio de ACN obtenidos se grafican en la Figura 10.

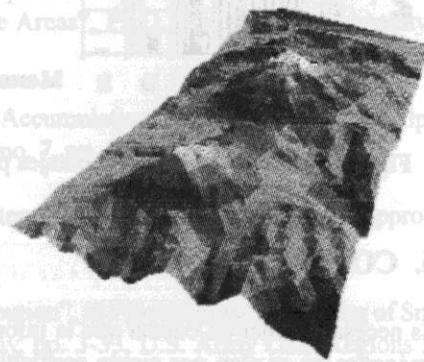


Figura 8. Zona 1.

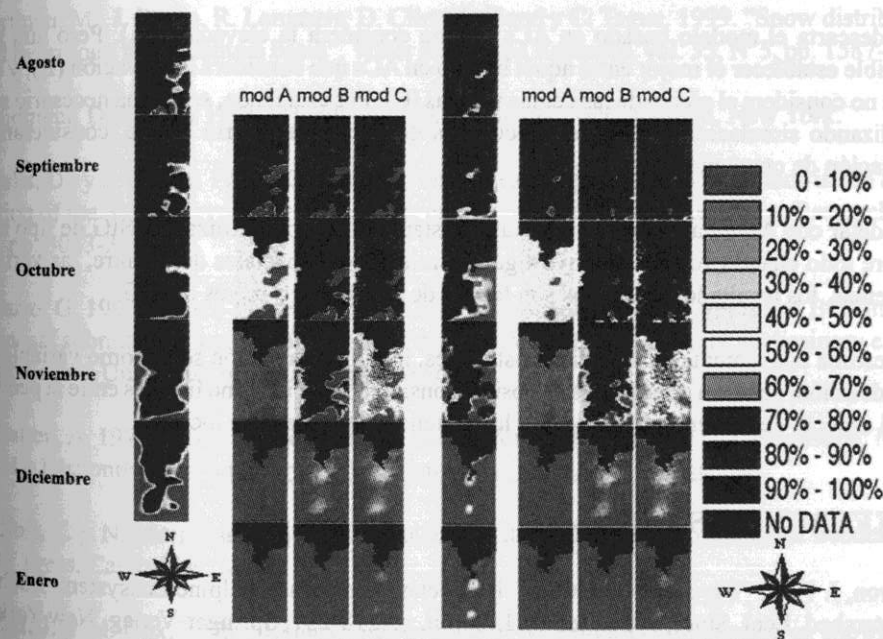


Figura 9. Probabilidad de nieve mensual promedio, Zona 1.

Las imágenes correspondientes a los meses de octubre y diciembre del año 1991 no representan situaciones normales pues fueron tomadas después de tormentas tardías en la zona. Esto explica los valores altamente superiores de ACN en comparación a los modelos, sobretodo en el mes de diciembre. Como se puede observar de los resultados obtenidos, para ambos años el peor modelo es el A, mientras que la respuesta de los modelos B y C es similar siendo casi siempre mayor el área nival estimada por el primero.

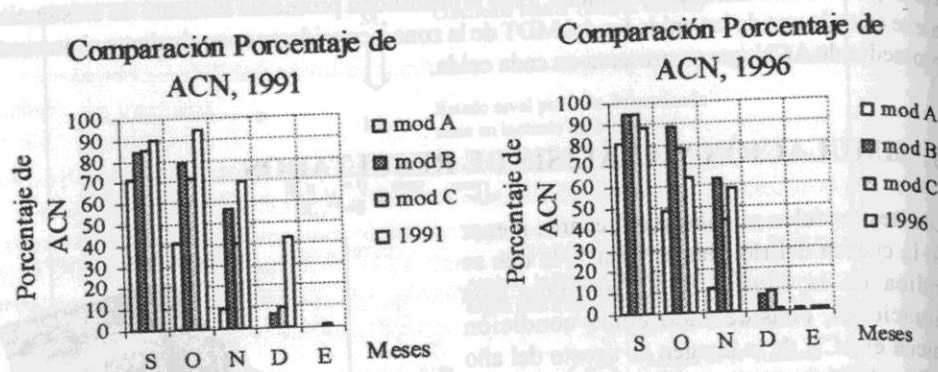


Figura 10. Comparación porcentajes promedios mensuales de ACN simulados, zona 1.

6. CONCLUSIONES

Es necesario tener en cuenta que la información de nieve con que se cuenta a través de las imágenes no es cien por ciento confiable, y por desgracia se desconoce el error que éstas poseen. Por otro lado, estos modelos no consideran la ocurrencia de tormentas tardías ni la influencia de variables climatológicas en el proceso nival por lo que se encuentran satisfactorios los resultados obtenidos, sobretodo porque simulan la representación espacial del fenómeno.

Se descarta el modelo basado en ACs que no considera la elevación (A). Pero aún no es posible establecer el mejor entre aquél basado en ACs que considera la elevación (B), y aquél que no considera el efecto de las celdas vecinas (C). Por esta razón, se estima necesario seguir realizando simulaciones en otras subcuencas de la cuenca del río Maule, considerando la situación de otros años.

Modelar con Autómatas Celulares resulta bastante práctico al utilizar un SIG de tipo raster, sobre todo cuando se necesita investigar las relaciones espaciales de, y entre, las variables. Además, los resultados obtenidos son fáciles de interpretar a través de SIG.

Se estima conveniente, en estudios posteriores, incluir la radiación solar como variable en la modelación, debido a que con ella es posible considerar relaciones no lineales entre la pendiente y el aspecto del terreno con el ACN y la influencia de horizontes locales.

REFERENCIAS

- Baron, J. 1992. "Biochemical Fluxes", in *Biochemistry of a Subalpine Ecosystem: Loch Vale Watershed*, Ecol. Stud., 90, edited by J. Baron, pp 218-231, Springer-Verlag, New York.
- Barros, A.P., y D.P. Lettenmaier. 1993. "Dynamic modelling of the spatial distribution of precipitation in remote mountainous areas". *Mon. Weather Rev.*, no. 121, pp.1195-1214.
- Becker, A., R. Avissar, D. Goodrich, D. Moon, y B. Sevruk. 1994. "Climate-hydrology-ecosystems interrelations in Mountainous Region (CHESMO)", An International Initiative for Integrative Research, BACH Rep. 2, International Geosphere-Biosphere Programme, Biospheric Aspect of the Hydrologic Cycle, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin, Berlin.

Clarke, K., J. Brass J., y P. Riggan. 1995. "A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 60, no.11, pp. 1355-1367.

Clarke, K., S. Hoppen y L. Gaydos. 1998. "Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth", United States Geological Survey, Human Induced Lands Transformations. Disponible en: <http://geo.arc.nasa.gov/usgs/HILTStart>.

Cline, D.W. 1995. "Studies Supporting the Development of Spatially-Distributed, Physically-Based Snowmelt Models for Continental Alpine Areas", Ph.D. dissertation, University of Colorado, Boulder.

Elder, K., J. Dozier y J. Michaelsen. 1991. "Snow Accumulation and Distribution in an Alpine Watershed". *Water Resources Research*, vol. 27, no. 7, pp. 1541-1552.

Gonçalves, P. 1994. "Geographic information systems and cellular automata: A new approach to forest fire simulation", EGIS.

Gray, D.M. 1979. "Snow accumulation and distribution", in *Proceedings "Modelling of Snow Cover Runoff"*, edited by S. Colbeck and M. Ray, pp. 3-33, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.

Gray, D.M. y T.D. Prowse. 1993. "Snow and floating ice". Capítulo 7 en Maidment (1993).

Hartman, M., J. Baron, R. Lammers, D. Cline, L. Band y C. Tague. 1999. "Snow distribution and hydrology in a mountain basin". *Water Resources Research*, vol. 35, N°5, pp. 1587-1603.

Maidment, D.R. (Ed.) 1993. "Handbook of Hydrology". McGraw-Hill, New York.

Marks, D., y J. Dozier. 1992. "Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra Nevada. 2: Snow cover energy balance", *Water Resources Research*, vol. 28, pp. 3043-3054.

Pizarro, G. 1999. "Three-Dimensional Cellular Automaton Model of Microbial Biofilms". A proposal submitted in partial fulfilment of the requirements for the Ph.D. preliminary examination at the University of Wisconsin-Madison.

Schatten, A. 1999. "Cellular Automata", *Digital Words* [en línea]. [fecha de consulta: Marzo 2001]. Disponible en : <http://www.ifs.tuwien.ac.at/~aschatt/info/ca/ca.html>

Toffoli, T. y N. Margolus. 1987. "Cellular Automata: A New Environment for Modelling", MIT Press, Cambridge, Mass.

Zuzel, J. y M. Cox. 1975. "Relative importance of meteorological variables in snowmelt". *Water Resources Research*, vol.11, pp. 174-176.

Von Neumann, J. 1966. "Theory of Self-Reproducing Automata", edited by A.W. Burks, University of Illinois Press, Urbana, Illinois.