

Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán

Manuel Mendoza*
Gerardo Bocco**
Erna López Granados*
Miguel Bravo***

Recibido: 22 de agosto de 2001
Aceptado en versión final: 4 octubre de 2002

Resumen. Este estudio intenta contribuir en la comprensión de las implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS) a nivel regional en el balance hídrico espacialmente distribuido (BHED) en una cuenca poco aforada para 1975 y 2000. Los resultados de esta investigación son producto de la integración de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica con un modelo de balance de agua; además, se utilizaron técnicas de análisis de dinámica de cambio. El análisis del cambio de los componentes del BHED a nivel de formas de relieve y por matrices de transición determinó que durante el periodo de estudio las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca no se modificaron sustancialmente. Sin embargo, las planicies y los piedemontes mostraron un incremento en los valores de escorrentía, como resultado de un incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos. En ambos años, las formas de relieve de las zonas bajas de la cuenca mostraron fuerte presión sobre el recurso hídrico, lo cual repercute en el deterioro del lago de Cuitzeo, principalmente por contaminación y reducción del suministro de agua superficial al vaso. El enfoque integral utilizado puede representar una alternativa viable para entender el cambio en la distribución y cantidad del agua disponible en cuencas poco aforadas como resultado de un CCVUS.

Palabras clave: Sistemas de información geográfica, percepción remota, matrices de transición, análisis regional, cambio de cobertura vegetal y del suelo, balance hídrico, cuencas poco aforadas.

Hydrological implications of land-cover and land-use change: a proposal for spatial analysis at a regional level in the closed Cuitzeo-lake basin, Michoacán

Abstract. This study was undertaken to understand the implications of regional land-cover and land-use change (LCLUC) in a spatially distributed water balance (SDWB) within a poorly gauged basin in 1975 and 2000. Results from this work were derived by integrating remote sensing and geographic information system tools with a water-balance model, along with the application of a transitional matrix analysis. The analysis of changes in water-balance components, based on landforms and transitional matrices, indicated a small tendency towards improvement in the basin's hydrological conditions at a regional level. However, as a consequence of the increase in urban land-use, the basin's plains piedmonts showed a rise in runoff. In addition, the basins' lower areas exhibited a high demand for water resources due to an increased urban land-use in both years, along with the Cuitzeo lake degradation, particularly in terms of pollution and reduction of surface water inflow. The integrated approach used herein constitutes a viable alternative for understanding changes in the amount and spatial distribution of water available in poorly gauged water basins as a consequence of LCLUC.

Key words: Geographic information systems, remote sensing, transitional matrix, regional analysis, land-cover and land-use change, water balance, poorly gauged basins.

*Instituto de Ecología-UNAM, Campus Morelia, 58089, Morelia, Michoacán. E-mail: mmendoza@oikos.unam.mx

** Instituto de Ecología-Morelia. Dirección actual: Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas, Periférico 5000, 2º. Piso, Col. Insurgentes Cuicuilco, 04530, Coyoacán, México, D. F. E-mail: gbocco@oikos.unam.mx

*** CENAPROS-INIFAP, Km. 18.5 Carretera Morelia-Aeropuerto, Álvaro Obregón, Michoacán, México. E-mail: bravom@cenapros.inifap.conacyt.mx

INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua y sus componentes precipitación, intercepción, escurrimiento, evaporación, transpiración y otros procesos subsuperficiales, incluyendo la recarga del agua subterránea, son temas centrales de la Hidrología. Cada uno de los componentes presenta una gran variación espacial y temporal, y juega un papel crítico en diversos procesos físicos, químicos y biológicos que regulan el sistema terrestre, donde la actividad humana es inseparable de los eventos naturales (Dunne y Leopold, 1978; Elkaduwa y Sakthivadivel, 1998). Actualmente se reconoce que el hombre altera el ciclo hidrológico a escala local y global. El cambio de la cobertura vegetal asociado con la expansión de la agricultura, la urbanización y la contaminación tienen una profunda influencia en los procesos hidrológicos, que es necesario investigar tanto en cuencas pequeñas como a nivel regional (Sahagian, 2000; Sharma *et al.*, 2000). El modelamiento a nivel regional del balance hídrico requiere de modelos hidrológicos capaces de ser aplicados sin calibración a nivel de cuenca, sobre grandes dominios geográficos (Arnell, 1999).

El modelamiento hidrológico en pequeñas cuencas o a nivel regional es ampliamente utilizado y ha demostrado su utilidad en la evaluación del impacto del cambio de uso del suelo (Henderson *et al.*, 1993; Kite, 1993; Harbor, 1994; Badhuri *et al.*, 1997; Sharma *et al.*, 2000), cambio climático a largo plazo (Gleick, 1987; Vorósmarty y Moore, 1991; Rind, 1992; Nikolaidis *et al.*, 1993; McGuffie *et al.* 1998; Xu, 2000) y si el modelamiento incluye la dinámica del carbón, nutrientes y sedimentos pueden servir como una herramienta semi-mecánica para cuantificar el transporte de materiales y contaminación no puntual (Vorósmarty *et al.*, 1989; Olivera, 1996).

El manejo de cuencas hidrológicas proporciona el marco conceptual y espacial que

permite elaborar e implementar normas y prácticas de conservación basadas en el entendimiento de procesos e interacciones ecológicas y sociales necesarias para asegurar la integridad ecológica de la cuenca y el suministro de productos para una población en aumento; así como evaluar el impacto de las actividades del hombre en los procesos hidrológicos; (EPA, 1995; Ersten, 1999; Jain *et al.*, 2000). Sin embargo, se debe admitir que no se pueden realizar diagnósticos veraces o manejos apropiados, si los datos hidrológicos son insuficientes para un análisis regional (véase Bergström y Graham, 1998). El problema se ha resuelto cuantificando los procesos hidrológicos en períodos del orden de varios años, o bien, simulando los procesos hidrológicos de la cuenca (Bastiaanssen, 2000a).

En Hidrología, al igual que en otras ciencias, el desarrollo de nuevos métodos de medición ha permitido avances significativos en el conocimiento de relaciones funcionales. Sin embargo, existen insuficiencias de tipo metodológico para el análisis de cuencas con ausencia de datos hidrométricos (Mendoza *et al.*, 2002a). En muchas regiones las redes hidro-meteorológicas son muy poco densas e incluso inexistentes, debido, entre otras razones, a que su establecimiento y mantenimiento es oneroso, particularmente, por el costo del equipo, su operación y el desarrollo de bases de datos. Lo anterior motiva la necesidad de desarrollar métodos indirectos (Meijerink *et al.*, 1994; Beek, 1996; Osman, 1996; Olsson y Pilesjo, 1999; Bastiaanssen, 2000a; Bastiaanssen, 2000b). Bajo una perspectiva no convencional, los métodos indirectos requieren reconocer las características y distribución espacial de escurrimientos y los componentes bióticos y abióticos de las cuencas, así como las relaciones espaciales y temporales entre éstos (Schaumm, 1964).

El objetivo de este trabajo fue analizar el cambio en el balance hídrico medio anual espacialmente distribuido, para dos tiempos

(1975 y 2000). en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. La meta fue entender las implicaciones del cambio de cobertura vegetal a nivel regional en una cuenca poco aforada. La estimación del balance hídrico medio anual se basa en la construcción de modelos mensuales de balance hídrico, los cuales son herramientas para el manejo de recursos hídricos (Xu y Vandewiele, 1994; Mendoza *et al.*, 2002b). En consecuencia, la comprensión del cambio hidrológico regional proporciona bases para la planeación y manejo de recursos terrestres e hídricos de grandes cuencas.

ÁREA EN ESTUDIO

La cuenca del lago de Cuitzeo se localiza en el Sistema Volcánico Transmexicano, entre los 19° 30' y 20° 05' latitud norte y 100° 35' y 101° 30' longitud oeste y ocupa una superficie de aproximadamente 4 000 km² (Figura 1). La cuenca está conformada por colinas, lomeríos altos y planicies, es decir, es una cuenca relativamente plana y con poca amplitud de relieve, la cual se desarrolla sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica del Mioceno

al Cuaternario (Mendoza *et al.*, en prensa; Pasquaré *et al.*, 1991). La cobertura vegetal predominante corresponde a las clases matorrales, bosque y cultivos (López *et al.*, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Balance hídrico

El balance hídrico desarrollado por Thornthwaite y Matter (1957) puede estimarse para un pequeño volumen de suelo o para una cuenca. En esencia, el método permite elaborar una contabilidad mensual de la humedad del suelo, la evapotranspiración real, el drenaje y la escorrentía, a partir de registros de precipitación y evapotranspiración potencial y observaciones de la vegetación y los suelos (Dunne y Leopold, 1978). Al utilizar un sistema de información geográfica (SIG), el balance de agua se modela tomando en cuenta la distribución espacial de la precipitación, evapotranspiración potencial y las características del suelo, en donde cada píxel es tratado como un balance hídrico individual.

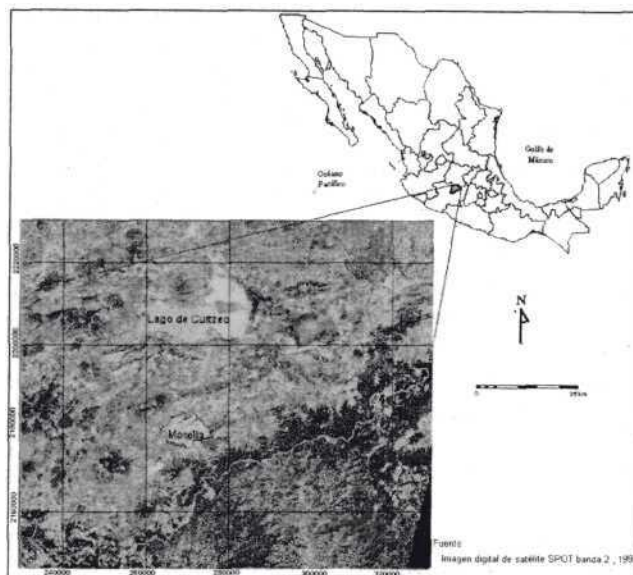


Figura 1. Localización de la cuenca del lago de Cuitzeo.

Considerando el caso más simple, esto es, bajo condiciones naturales (por ejemplo, sin extracciones por bombeo), con referencia a una cuenca en donde coinciden los límites topográfico y freático, y donde el agua subterránea ocurre en acuíferos no confinados, el balance de agua se representa con la siguiente ecuación (Freeze y Cherry, 1979):

$$P - Q_{ETA} = (R_i + R_{SW}) - CR - Q_{GW} \quad (1)$$

donde:

P es precipitación,
 Q es el escurrimiento superficial,
 ETA es la evapotranspiración actual,
 $(R_i + R_{SW})$ es la recarga del acuífero (por infiltración o desde cuerpos de agua superficiales),
 CR es el movimiento del agua subterránea hacia la zona de capilaridad, y
 Q_{GW} es la contribución del agua subterránea al caudal de corrientes naturales.

Todos los componentes representan flujos o almacenamientos sobre periodos de tiempo arbitrarios, en este caso, en el largo plazo (un año), por lo tanto, los cambios en almacenamiento son insignificantes.

Para los fines del presente trabajo se hará énfasis en el cálculo de los términos del lado izquierdo, particularmente para cuencas que carecen de registros de aforo. La estimación de los términos del lado derecho escapan a los propósitos de este trabajo, sin embargo, se abordaran en términos generales.

En el modelo original de Thornthwaite y Mather (1957), la estimación del escurrimiento superficial, llamada excedente de humedad, se obtiene como una proporción del agua que no puede ser almacenada en el suelo; los autores sugieren que, para grandes cuencas, el 50% del excedente de agua para cualquier mes escurre superficialmente y que el restante 50% es retenido temporal-

mente en la cuenca para abastecer la escorrentía del mes siguiente (Thornthwaite y Mather, 1957; Dunne y Leopold, 1978).

En el modelo del presente trabajo, primero se estimó la escorrentía en función de las características biofísicas de la cuenca (relieve, pendiente, textura y profundidad de suelos, cobertura vegetal y uso del suelo). Posteriormente, se sustrajo de la precipitación, el escurrimiento, para calcular la precipitación efectiva; ésta se define como la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento superficial. Se asume que el excedente de humedad en el suelo es, en este caso, principalmente agua para la recarga del manto freático. A continuación se describe el procedimiento utilizado para estimar los componentes del balance hídrico espacialmente distribuido (Figura 2).

Geomorfología y cobertura vegetal y uso del suelo

La interpretación geomorfológica se realizó con base en fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro, escala aproximada 1:50 000 de 1975, a partir de claves estándar de fotointerpretación (Verstappen y Van Zuidam, 1991), con lo cual se discriminan laderas en forma jerárquica (Mendoza *et al.*, en prensa). Los mapas cobertura vegetal y uso del suelo (CVUS) se derivaron de la interpretación de fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro de 1975 y 2000, a escala aproximada 1:50 000 y 137 000 (López *et al.*, 2001) La interpretación de la CVUS se realizó bajo criterios de clasificación fisonómica-estructural (Anderson *et al.*, 1976), considerando las categorías requeridas en el modelo hidrológico utilizado.

Cálculo de los componentes del balance hídrico

Precipitación y temperatura

La precipitación y la temperatura son pará-

metros de entrada en el balance de agua y su representación adecuada en un modelo hidrológico es importante, pero difícil. La interpolación de isoyetas e isotermas es compleja cuando la cobertura de estaciones meteorológicas es baja, como es el caso de la cuenca en estudio. En este trabajo, la precipitación media mensual (Pmm) y la temperatura media mensual (Tmm) se calcularon a partir de los registros históricos de 42 estaciones meteorológicas localizadas tanto al interior de la cuenca como en sus alrededores. El cálculo y los mapas de Pmm y Tmm se realizaron mediante técnicas de interpolación lineal, utilizando el inverso de la distancia.

Evapotranspiración potencial

El cálculo de la evapotranspiración potencial (Etp) se realizó con el modelo de Serruto (1993); se usó este método porque considera dos variables que Thornthwaite y Matter (1957) incluyeron en sus modelos: la Tmm y la radiación solar (esta última calculada por la FAO, 1976) para diferentes latitudes. Siguiendo este procedimiento se construyó la distribución mensual de la Etp. El modelo propuesto por Serruto (1993) es el siguiente:

$$Etp = (0.003*(RS)^{2.5} + 0.16*(T)^{0.88}) * 31 \quad (2)$$

donde:

T = temperatura media mensual en °C (mapas corregidos)

RS = radiación solar en equivalente de evaporación en mm/día

Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial es la porción de la precipitación que no se infiltra ni se acumula en la superficie del suelo, pero que fluye aguas abajo como flujo laminar o concentrado (Chow *et al.*, 1988). Existen diversos métodos para medir y estimar el es-

currimiento (Esc). El método utilizado en el presente trabajo es simple, considera que el Esc se produce a partir del exceso de agua que se genera en toda la cuenca. En este método el Esc es una función de la precipitación, textura del suelo, velocidad de infiltración, CVUS, y pendiente del terreno (USDA, 1964 citado por Beek, 1996).

Con fines prácticos se relacionó la permeabilidad y la velocidad de infiltración (SARH-CP, 1991). La permeabilidad es una característica física del medio poroso; por lo tanto, está relacionada con la distribución y tamaño de poros y su continuidad (Hillel, 1998). Es muy probable, aunque no necesario, que un suelo con alta porosidad exhiba una alta velocidad de infiltración. A su vez, la infiltración puede ser estimada a partir de clases texturales (SARH-CP, 1991).

Para representar la distribución de las clases texturales de suelos en la cuenca se utilizó la cartografía de INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983); en ésta se identifican tres categorías: fina, media y gruesa. Éstas categorías texturales se traducen en velocidad de infiltración baja (0.2 a 2 cm/h), media (2.0 a 12.5 cm/h) y alta (> 12.5 cm/h), respectivamente (SARH-CP, 1991).

La información de los mapas de CVUS correspondientes a 1975 y 2000 se cruzó con la del mapa de velocidad de infiltración para obtener una tabla de dos dimensiones para cada año. La tabla anterior de vegetación y velocidad de infiltración, se cruzó nuevamente con la del mapa de pendientes, obteniéndose una matriz de dos dimensiones, con la cual se clasificó el porcentaje de escurrimiento, de acuerdo con el *US Soil Conservation Service* (1964, en Beek, 1996). El mapa de pendientes en porcentaje se construyó a partir de la aplicación de filtros direccionales sobre el Modelo Digital de Terreno (MDT).

Finalmente, los mapas de porcentaje de

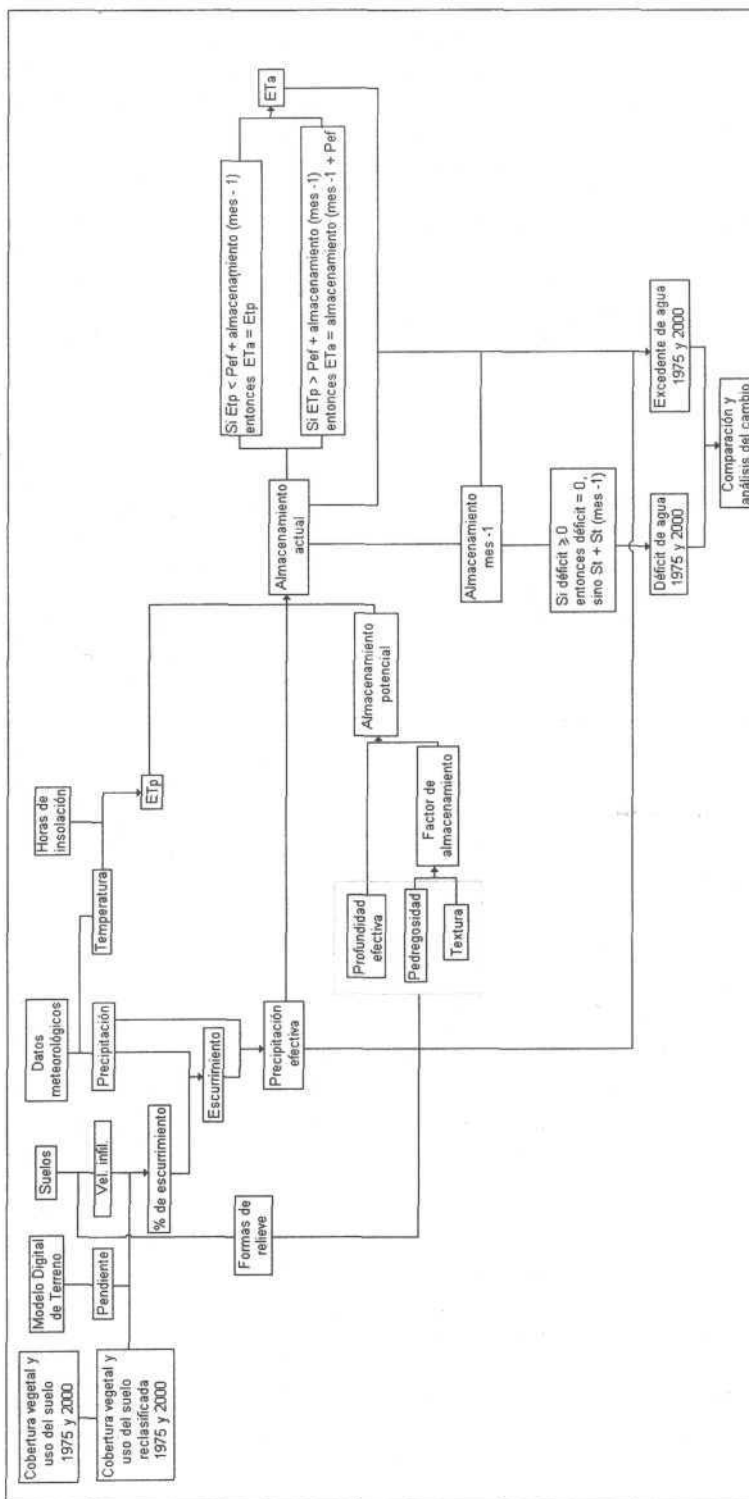


Figura 2. Esquema del método utilizado en la investigación.

escurrimiento mensual se multiplicaron por cada mapa de Pmm, con objeto de generar la distribución mensual del Esc medio. Por sustracción en cada uno de los mapas de Esc medio mensual, y de los correspondientes mapas de precipitación, se crearon doce mapas de precipitación efectiva (Pef); es decir, la cantidad de agua que se infiltra en el suelo.

Almacenamiento potencial de la humedad del suelo

La cantidad de agua almacenada en el suelo, útil para las plantas, es factor importante en el balance hídrico. Es importante calcular la máxima cantidad de agua que puede almacenar el suelo, la cual puede definirse por una relación entre la textura y la pedregosidad de la matriz del suelo (Landon, 1984).

La pedregosidad fue estimada para toda la cuenca en función de las fases físicas y de las asociaciones de los mosaicos de suelo del mapa sin generalizar de INEGI. Del mapa de fases físicas se extrajo la categoría "pedregoso" y, posteriormente, se cruzó con las asociaciones de suelos. Para cada asociación con pedregosidad se estimó el porcentaje potencial de pedregosidad.

La distribución de la profundidad de suelos y la textura se obtuvo de la reclasificación de las unidades de relieve, en función de la clase de profundidad más representativa. Se utilizaron los datos de 156 pozos de suelo y sus análisis de laboratorio, los cuales fueron elaborados por INEGI (1971; 1973; 1979; 1982; 1983). Con objeto de incluir en el modelamiento el carácter volcánico reciente en la cuenca y su capacidad de retención de agua, se extrajeron del mapa de relieve las clases "conos volcánicos" y "coladas de lava". Este tipo de unidades posee una alta permeabilidad por sus características físicas. El mapa de texturas fue el resultado de la integración del mapa de texturas preliminar

con el mapa de conos y coladas. Finalmente, las bases de datos de textura y pedregosidad se combinaron por medio de una reclasificación con un cuadro de doble entrada.

Cálculo del almacenamiento real de humedad

El almacenamiento real varía con el tiempo debido a la Pef que aporta el agua y a la evapotranspiración que la sustrae. De acuerdo al modelo de Thornthwaite y Matter (1957), es necesario reflejar las variaciones mensuales tomando en cuenta que el mes anterior puede almacenar agua, siempre que la precipitación sea mayor a la evapotranspiración, con lo cual se tendría incremento en el almacenamiento en el suelo. El agua se almacenará hasta la capacidad de almacenamiento potencial, la cual es determinada por la porosidad y profundidad del suelo ($S_{(a)} = S_{(p)}$). En la estructura del balance se considera que cualquier exceso que rebase la capacidad de campo se transformará en excedente de agua, el cual se percolará, como se mencionó anteriormente. La siguiente expresión muestra esta relación:

$$S(a)_{mes-1} - Etp \quad (3)$$

donde: $0 \leq S_{(a)} \geq S_{(p)}$

$S_{(a)}$ = almacenamiento real en mm,
 $P_{(ef)}$ = precipitación efectiva en mm,
 $S(a)_{mes-1}$ = almacenamiento real del mes anterior,
 Etp = evapotranspiración potencial.

Evapotranspiración real

La Etp es la cantidad que teóricamente puede evaporarse si existiera suficiente agua, considerando tanto la precipitada en el mes como la almacenada en el suelo. La evapotranspiración real (Etr), por su parte, es la cantidad de agua que realmente transpiran las plantas, más la que se evapora del suelo desnudo. En el caso de que exista suficiente

agua y energía (o en situaciones de exceso) la Etp es igual a la Etr. Si no hay suficiente agua la $Etr < Etp$.

Con base en el modelo utilizado, la Etr depende de la Pef de la Etp y del almacenamiento del agua en el suelo en el mes anterior. Cuando la Pef y el almacenamiento del mes anterior es igual o mayor que la evapotranspiración potencial, la Etr es igual a la Etp. Si la Pef y el almacenamiento del mes anterior es menor que la Etp, la Etr es igual a la Pef y al almacenamiento del mes anterior, es decir,

$$P_{(ef)} + S_{(a) \text{ mes } -1} \geq Etp \text{ entonces } Etr = Etp \quad (5)$$

$$\text{sino } Etr = P_{(ef)} + S_{(a) \text{ mes } -1}.$$

Los cálculos se inician a partir de junio, mes en que se presenta la retención de humedad, ya que mayo es el primer mes de lluvia. Para junio se utilizó el mapa de capacidad de retención de humedad real, como valor de almacenamiento del mes de mayo. En los meses siguientes el almacenamiento fue calculado con el valor del mes anterior para cada mes, considerando como inicio junio. Cuando los valores de almacenamiento real calculados fueron negativos, se reclasificaron como cero.

Déficit de agua medio mensual en el suelo

La cantidad de agua en el suelo descenderá cuando la Pef sea menor que la Etp, produciéndose un almacenamiento igual a cero; sin embargo, las plantas siguen requiriendo agua para transpirar, entonces ocurre un déficit (Def). El déficit en este caso no se refiere a la situación de estrés de las plantas conocido como punto de marchitez permanente. En este caso, los cálculos comenzaron a partir del mes de junio, y se obtuvo un mapa de déficit para cada mes. El déficit se estima mediante la siguiente ecuación:

$$Def = Etp - P_{(ef)} + S_{(a) \text{ mes } -1} \quad (6)$$

Excedente de agua medio mensual en el suelo

Cuando la Pef es mayor que la evapotranspiración potencial, la cantidad de agua almacenada en el suelo aumenta hasta el nivel máximo que permite la capacidad de almacenamiento potencial ($S_{(a)} = S_{(p)}$). Si más agua entra al suelo, el modelo la considera como excedente de agua (Exc), que se percolará. Se calculó un mapa de excedente de agua en el suelo para cada mes. La siguiente ecuación expresa esta relación:

$$Exc = P_{(ef)} - Etr - S_{(a)} + S_{(a) \text{ mes } -1} \quad (7)$$

Balance hídrico anual

Los mapas de los componentes del balance hídrico medio mensuales de cada año fueron agregados, a fin de generar mapas de componentes medios anuales de 1975 y 2000. Estos mapas fueron reclasificados con base en criterios estadísticos para cada componente y para cada par de años (1975 y 2000), toda vez que estos mapas se comparan entre sí. Los intervalos de reclasificación se denominaron Muy Alto, Alto, Moderado, Bajo y Muy Bajo, donde generalmente, el valor medio se ubica en el intervalo Moderado.

Por último, se analizó el cambio de los componentes del balance hídrico para toda la cuenca. Para ello se cuantificó, en primer lugar, el cambio general de la categoría por componente y la dinámica del cambio a través de matrices de transición. En cada matriz, la diagonal representa la probabilidad de cada categoría de permanecer o mantenerse de un tiempo a otro (Luenberger, 1979). En este trabajo se construyeron matrices de transición con base en las superficies obtenidas de cada uno de los mapas, que representan los componentes del balance hídrico en 1975 y 2000. A partir de ellas se elaboraron matrices de probabilidad de transi-

ción para cada una de las clases de cada componente. Se supuso que la probabilidad de transición (P_{ij}) de cada clase de la matriz es proporcional a la superficie remanente de la misma clase entre 1975 y 2000. Su expresión matemática es:

$$P_{ijA} = S_{ij}(1975) / S_j(2000) \quad (8)$$

Donde S_{ij} es la superficie del elemento "ij" de la matriz de transición de cada componente del balance hídrico en 1975 y " S_j " la superficie de la clase de cada componente del balance hídrico "j" en 2000. De esta manera, para cada categoría de cada componente "j", $\sum P_{ij} = 1$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambio de cobertura y uso del suelo

Las clases de CVUS predominantes en la cuenca en 1975 y en 2000 correspondieron a cultivos (44% y 32%, respectivamente), seguidas por la categoría de bosques y vegetación densa (17 y 20%, respectiva-

mente). En el periodo de estudio, los bosques y vegetación densa, pastos y bosques abiertos, y arbustos, se incrementaron en 18, 28 y 20%, respectivamente (Figuras 3, 4 y 5).

Análisis del cambio de los componentes del balance hídrico anual

Escurrimiento medio anual

Se realizó un análisis de la magnitud del error de los valores estimados de la escurrimiento mensual con relación a los datos mensuales registrados para tres subcuencas de la cuenca de Cuitzeo. Los resultados indican que la sobrestimación anual fue 2.9, 2.2 y 1.6 veces respectivamente. La sobrestimación promedio fue de 2.3 veces; sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo se encuentran entre los rangos de sobrestimación y subestimación previamente obtenidos en la estimación de escurrimientos con modelos espacialmente distribuidos en grandes cuencas (Arnell, 1999; Wood y Blackbum, 1984).

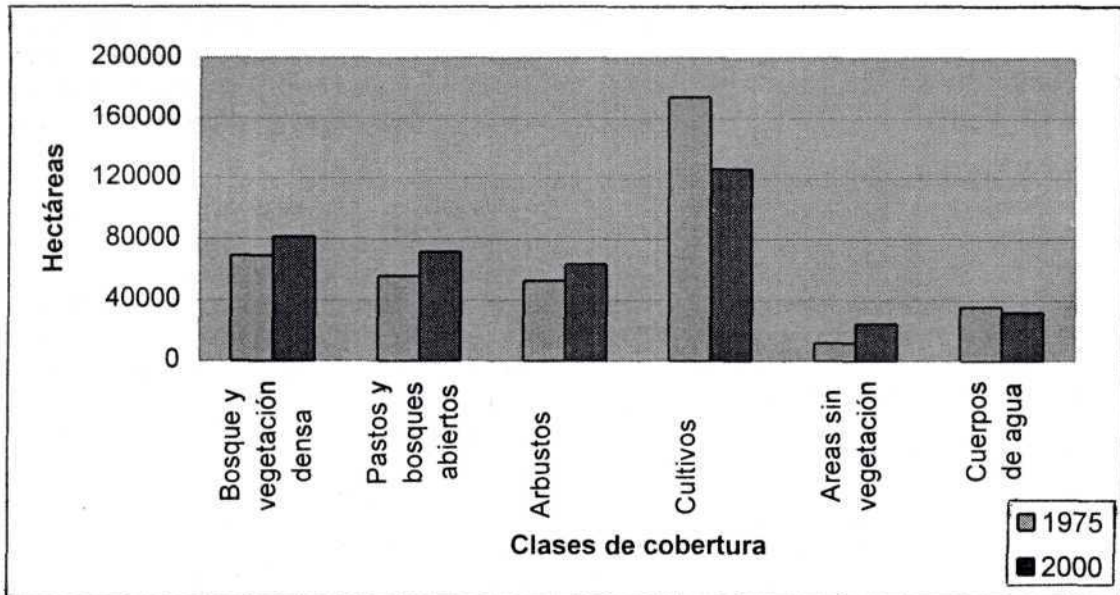


Figura 3. Cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca del lago de Cuitzeo.

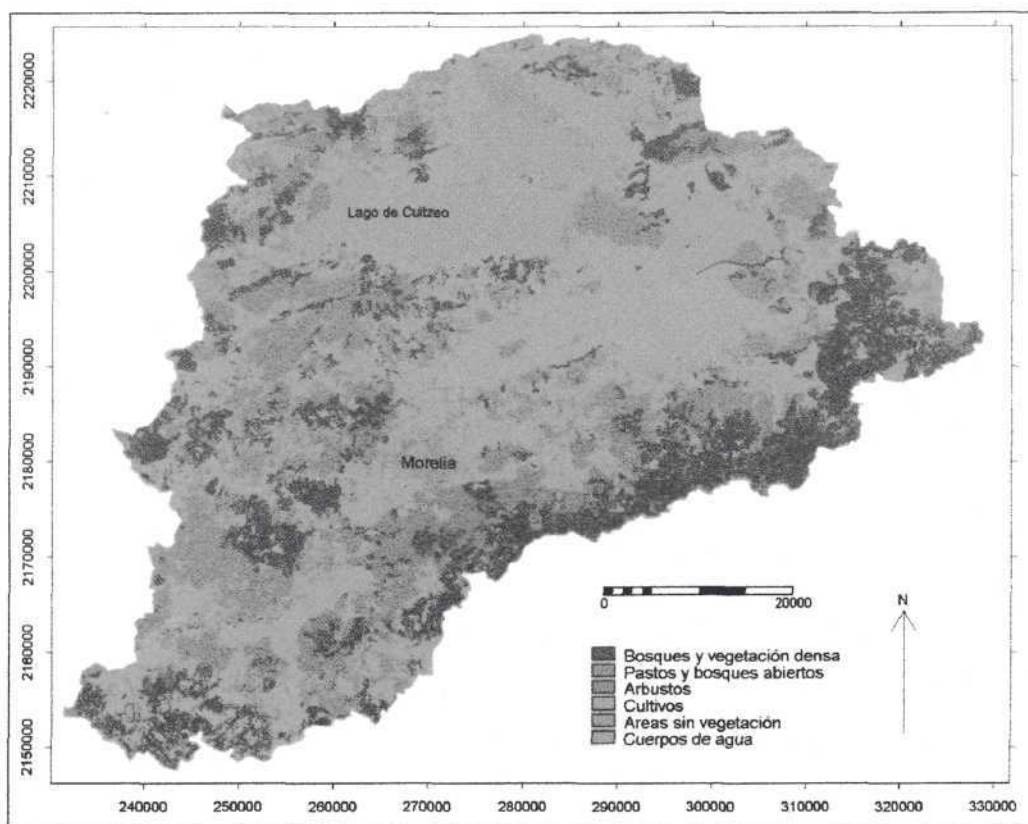


Figura 4. Cobertura vegetal utilizada para el cálculo del balance hídrico de 1975 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

En consecuencia, el análisis de las implicaciones del CCVUS se realizó en mapas de valores reclasificados. De los mapas clasificados se calcularon las superficies ocupadas por cada clase en cada año, así como la superficie de cambio (Figura 6). Se aprecia que la categoría predominante en ambos años fue la Moderado (49 y 35 %, respectivamente), seguida por la clase Alto (56 y 31%). Los mayores cambios ocurrieron en las categorías Muy Bajo, Bajo, Moderado y Alto; sin embargo, en esta última clase el cambio fue negativo (Figuras 7 y 8). Estos resultados nos sugieren que, con respecto a 1975, en el 2000 la capacidad de la cuenca para producir escurrimientos superficiales se redujo, porque el escurrimiento anual fue menor en aproximadamente 300 mm.

Las categorías más representativas de escurrimiento por unidades de relieve corresponden a las clase Moderado y Alto en ambos años, seguidas por la clase Bajo. La dinámica entre años y categorías de relieve indica cierta mejoría en las condiciones hidrológicas; trece formas de relieve disminuyeron su superficie en clase Alto, las mismas formas de relieve aumentaron su superficie en la clase Moderado; diez formas de relieve aumentaron su superficie en la clase Bajo. Las formas de relieve más afectadas por un incremento en la superficie de escurrimiento en la categoría Alto son planicie, valle amplio y piedemonte bajo. Las formas de relieve que aumentaron superficie en la clase Moderado son planicie fluvial, planicie con vegetación, planicies inundables, piedemontes bajo y no diferenciado.

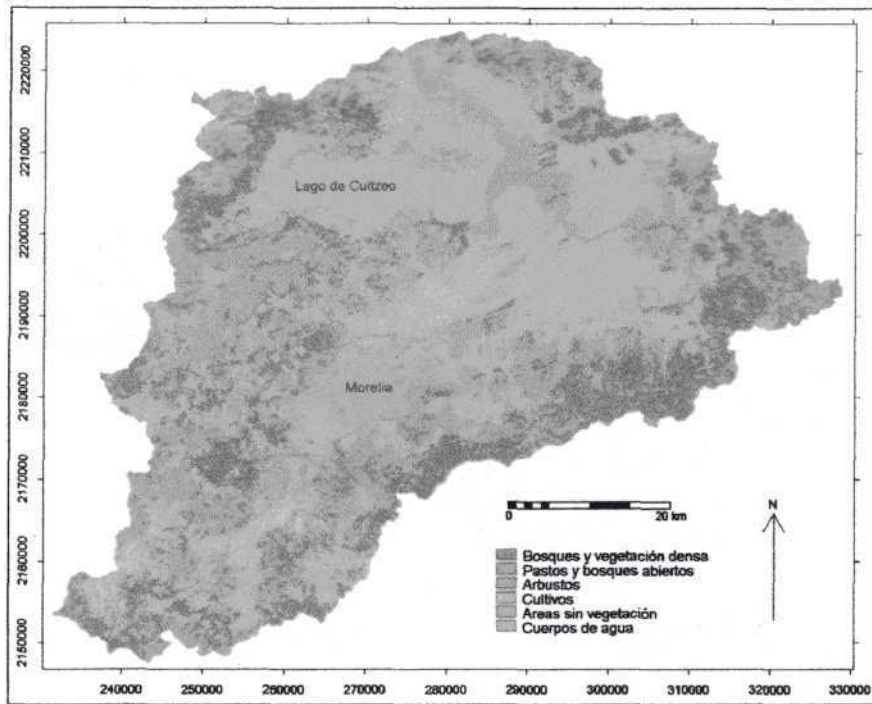


Figura 5. Cobertura vegetal utilizada para el cálculo del balance hídrico de 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

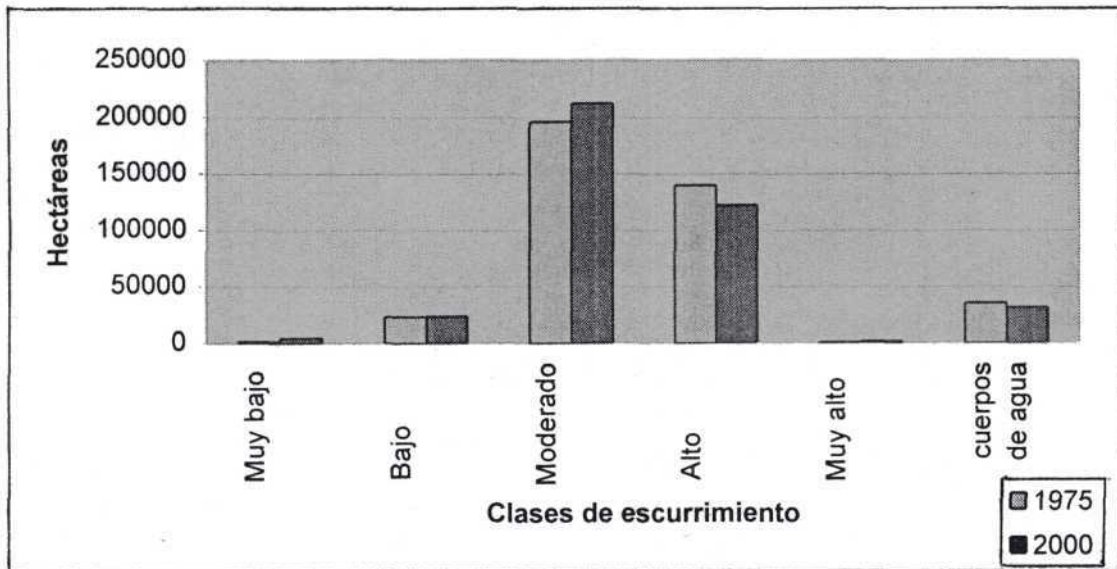


Figura 6. Distribución de las superficies por clase de escurrimiento para 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

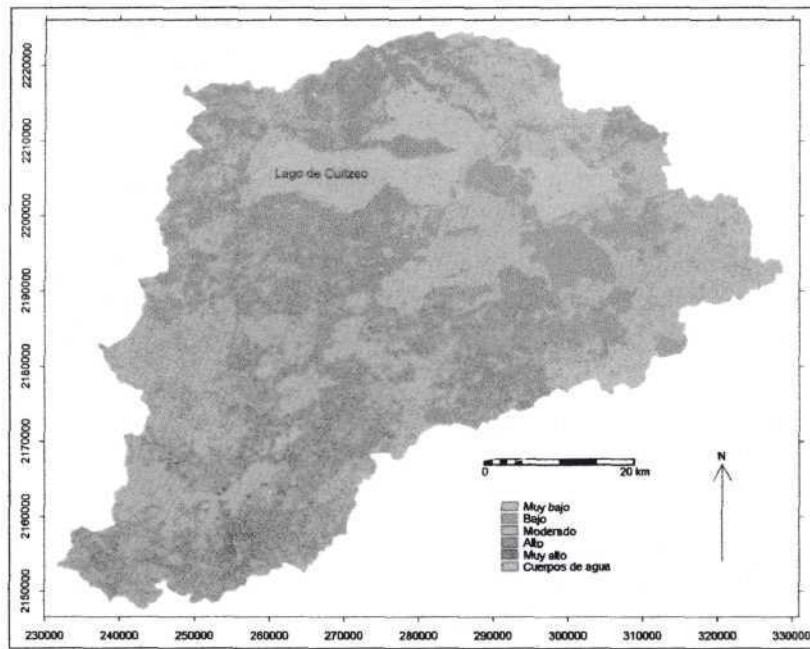


Figura 7. Mapa de escurrimiento medio anual de 1975 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

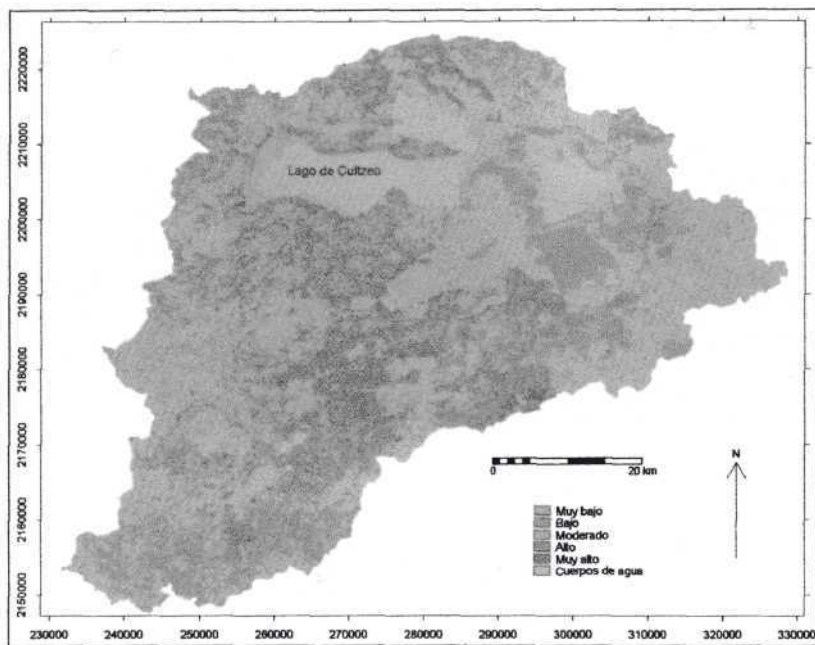


Figura 8. Mapa de escurrimiento medio anual de 2000 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

Precipitación efectiva media anual por año

De los mapas de Pef, la mayor superficie para 1975 y 2000 corresponde a la categoría Bajo (45 %) y Moderado (41 y 48%, respectivamente). El análisis del cambio de las categorías de Pef para cada año por clase indica que hubo un incremento de alrededor de 14 000 ha en la clase Moderado, como resultado de una disminución de la misma magnitud en la clase Bajo (Figura 9). Los resultados sugieren que, con respecto a 1975, en el 2000 hubo una mayor acumulación de agua en el suelo, particularmente en más de 2 600 ha, las cuales retuvieron cuando menos 600 mm anuales de agua en el suelo.

Las categorías de Pef más representativas por unidades de relieve corresponden a Bajo y Moderado, y cubren aproximadamente el 90% de las clases de relieve en ambos años. También se presentan condiciones de relativa mejoría en la cuenca. Trece formas de relieve aumentaron su superficie de Pef de clase Bajo a clase Moderado; cinco

formas de relieve pasaron de clase Bajo a clase Moderado. Las formas de relieve que más aumentaron su superficie en la clase Moderado son planicie con vegetación, zona de inundación, piedemonte medio y elevaciones aisladas.

Evapotranspiración real media anual

Las categorías predominantes de Etr para 1975 y 2000 son la Muy Bajo (70 y 68%, respectivamente) y Bajo (20 y 22%). El cambio de la Etr por categorías indica una reducción de casi 5 400 ha en la clase Muy Bajo; mientras que las clases Bajo y Moderado tuvieron un incremento de 8 000 ha, reflejo del aumento de la cobertura vegetal (bosques y arbustos; Figura 10).

En relación con la Etr por formas de relieve, en ambos años las clases más representativas corresponden a Muy Bajo y Bajo. Los incrementos en porcentajes de superficie por clase de Etr en formas relieve se dan principalmente hacia las clases Muy Bajo (14) y Moderado (10); la superficie de 13 formas de relieve en la clase Muy Bajo se

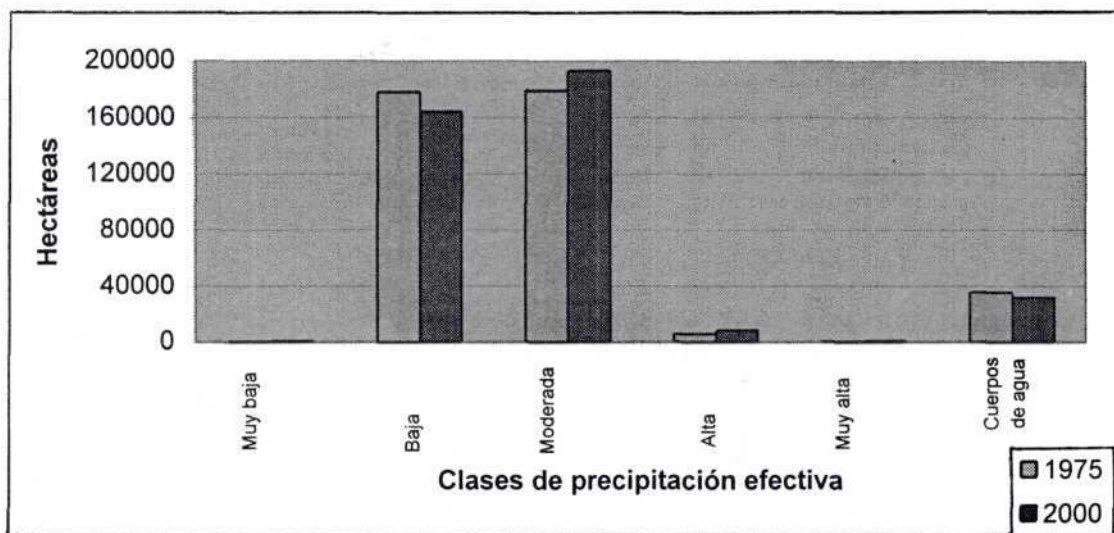


Figura 9. Distribución de las superficies por clase de precipitación efectiva media anual para 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

redujeron, estos resultados eran de esperarse, toda vez que existe un aumento en la cobertura vegetal con mayor capacidad para transpirar. Las formas de relieve que aumentaron más su superficie de Etr en la clase Moderado son las planicies inundables. Las formas de relieve que aumentaron su superficie en la clase Bajo son la planicie fluvial y piedemonte superior.

Déficit medio anual de agua

Las categorías predominantes de Def para 1975 y 2000 son Alto (37 y 35%, respectivamente), y Muy Alto (40 y 32 %; Figuras 11 y 12). Sin embargo, la clase Muy Alto redujo su superficie en más de 10 000 ha, y la clase Alto aumentó su superficie en más de 9 000 (Figura 13).

Las formas de relieve se caracterizan por presentar déficit de agua medio anual Alto, Muy Alto y Moderado, respectivamente. Sin embargo, las condiciones hidrológicas regionales por unidad de relieve también presentan cierta mejoría; doce formas de relieve pasaron de déficit Muy Alto a déficit Alto, cinco formas de relieve pasaron de Alto a Moderado, cinco pasaron de Moderado a Bajo; sin embargo, trece formas de relieve

pasaron de déficit Moderado a Alto. Las formas de relieve que sufrieron los cambios más importantes son planicie con vegetación y elevaciones aisladas, que cambiaron de Alto a Muy Alto; y planicie de inundación salina y zonas de inundación que pasaron de Muy Alto a Alto.

Excedente medio anual de agua

El excedente medio anual de agua fue tan bajo en 1975 y 2000, que la mayor parte de la cuenca quedó clasificada en la clase Cero o nula (65 y 63%, respectivamente; Figuras 14 y 15); en 1975 el 11% quedó clasificada como Muy Bajo, y el 14% como Bajo; mientras que para el 2000, las clases Muy Bajo y Bajo sólo se incrementaron en un punto porcentual (Figura 16). Las categorías más representativas fueron Cero, Muy Bajo y Bajo; además, es notorio que la mayor parte de las formas de relieve tienen excedente de Cero en una superficie considerable en ambos años. Sin embargo, existe una tendencia a que las formas de relieve incrementen su excedente a lo largo del tiempo, es decir, que cambien de clase Cero a Muy Bajo (6), Muy Bajo a Bajo (7) y de Bajo a Moderado (7); esta dinámica permite inferir que las condiciones hidrológicas en la cuenca del lago de Cuitzeo mejoraron ligeramente.

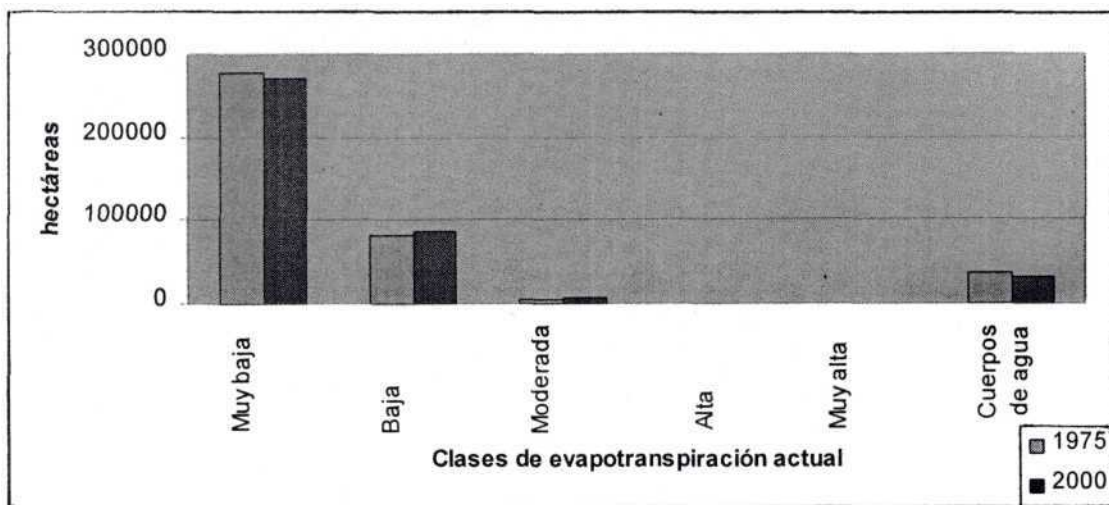


Figura 10. Distribución de las superficies por clase de evapotranspiración real media anual para 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

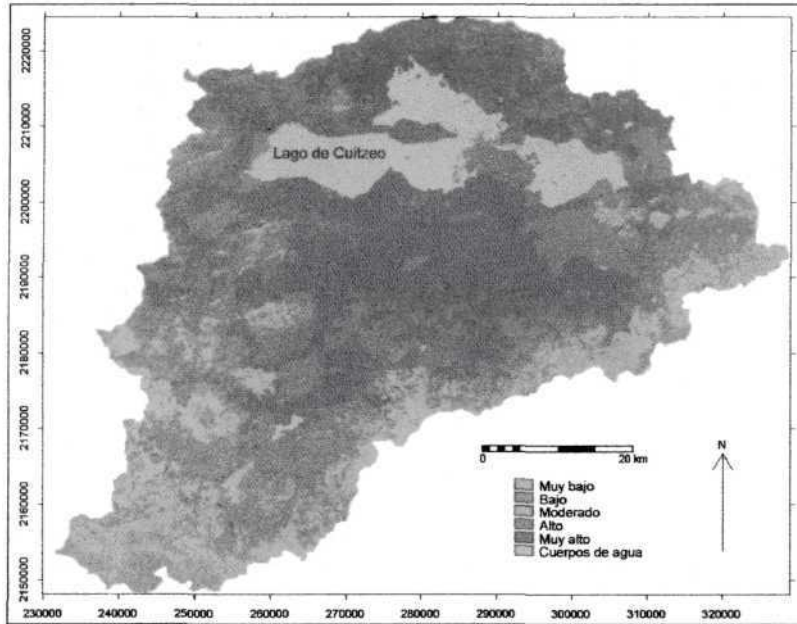


Figura 11. Mapa de déficit medio anual de agua de 1975 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

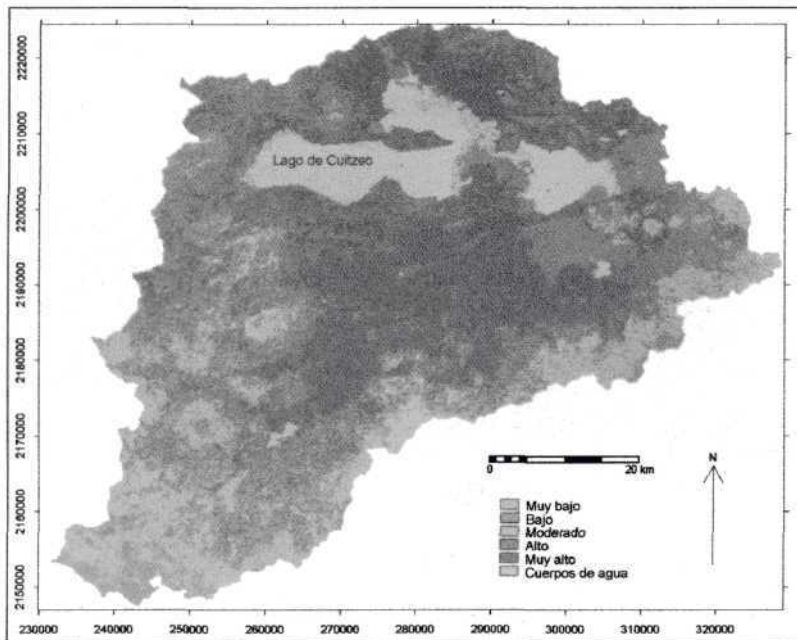


Figura 12. Mapa de déficit medio anual de agua de 2000 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

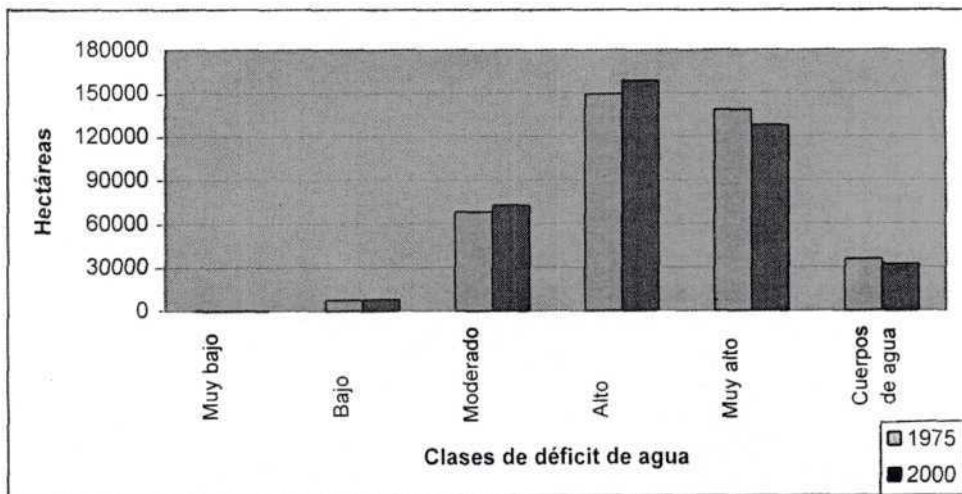


Figura 13. Distribución de las superficies por clase de déficit medio anual para 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

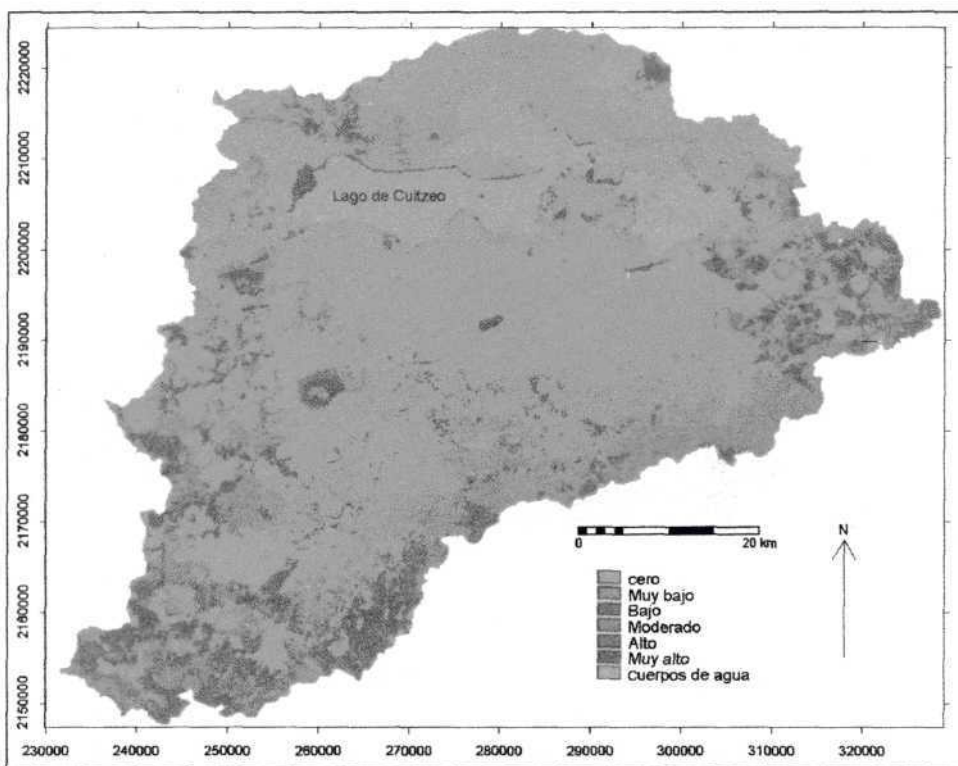


Figura 14. Mapa de excedente medio anual de agua de 1975 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

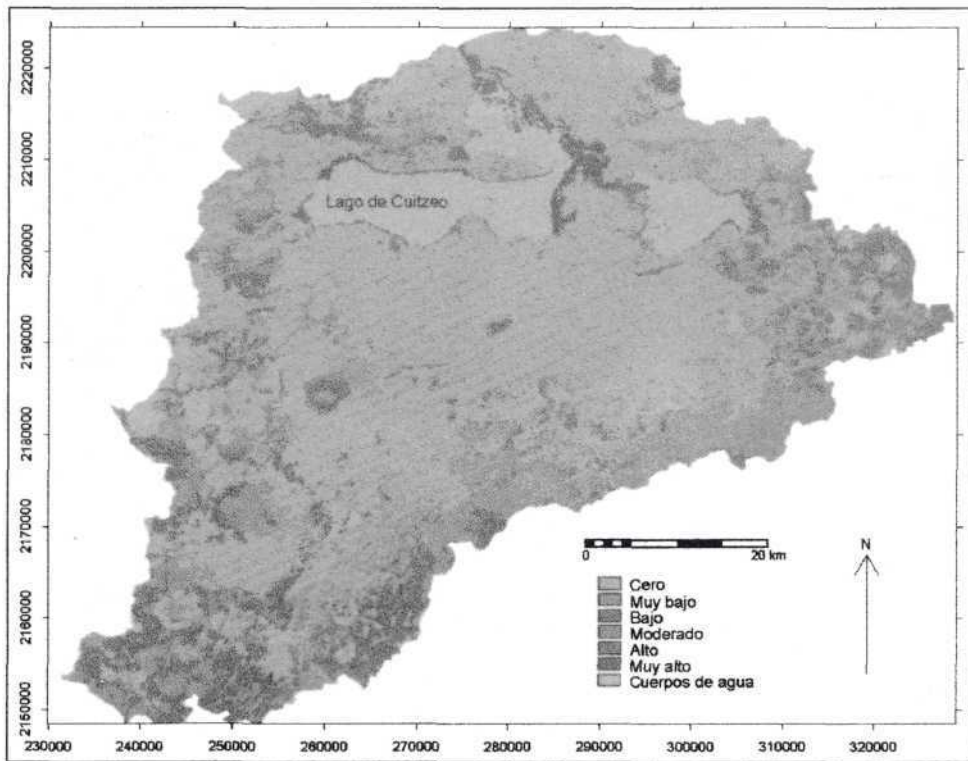


Figura 15. Mapa de excedente medio anual de agua de 2000 en la cuenca del lago de Cuitzeo.

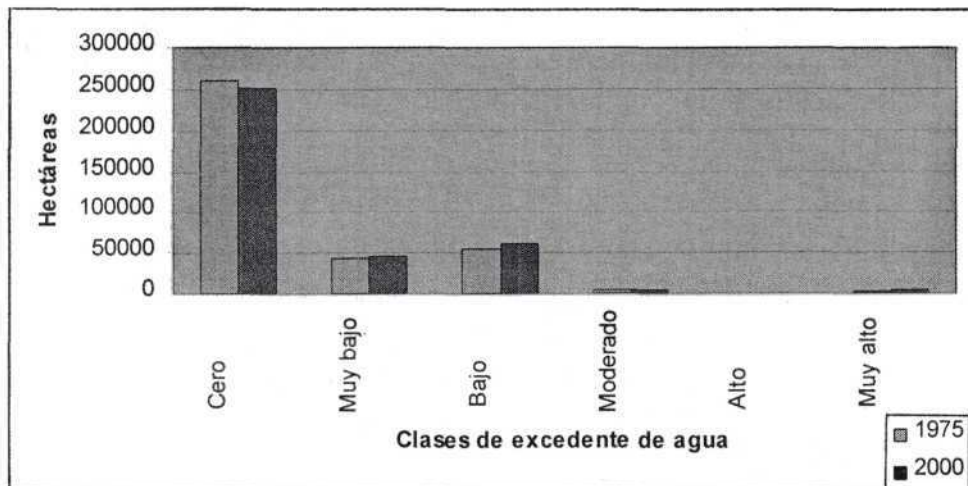


Figura 16. Distribución de las superficies por clase de excedente medio anual para 1975 y 2000 de la cuenca del lago de Cuitzeo.

Las formas de relieve con incremento importante en superficie en la clase Moderado corresponden a la planicies fluviales, mientras que las formas de relieve que más incrementaron su superficie en la clase de excedente Bajo son las planicies con depósitos de sal e inundables.

Análisis del cambio de los componentes del balance hídrico con matrices de transición

Escorrimento medio anual de agua

Los valores de las superficies de coincidencia entre las categorías de escurrimiento de cada año se normalizaron en función del año base, con lo cual se construyó la matriz de probabilidades de transición de las distintas categorías de escurrimiento (Cuadro 1). Este procedimiento se aplicó para la evaluación de todos los componentes del balance hídrico. De la matriz de transición se puede destacar que las clases Alto y Muy Alto

tienen probabilidades relativamente bajas de permanencia (menores a 70%), además de probabilidades de cambio de las clases Muy Alto y Alto hacia la clase Moderado (11 y 31%), aunada a la probabilidad de cambio de Muy Alto a Alto de 26%, estos porcentajes indican una relativa mejoría en las condiciones de escurrimiento en la cuenca. Sin embargo, la clase Bajo tiende a pasar a Moderado en 21% y la clase Moderado tiende a transformarse en Alto en 14%.

Precipitación efectiva media anual

Las probabilidades de transición (Cuadro 2) muestran que la Pef tiene bajas probabilidades de permanecer en la clase Muy Bajo (52%); en consecuencia, esta clase tiende a cambiar a Bajo (43%) y Moderado (5%). Además, es notoria la alta probabilidad de permanencia de la clase Muy Alto (95%). La matriz indica, en términos generales, mejores condiciones hidrológicas a nivel regional.

Cuadro 1 Probabilidades de transición de las clases de escurrimiento entre 1975 y 2000

1975	2000				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Muy bajo	0.97	0.03	0.00	0.00	0.00
Bajo	0.03	0.76	0.21	0.00	0.00
Moderado	0.00	0.03	0.83	0.14	0.00
Alto	0.00	0.00	0.31	0.68	0.01
Muy alto	0.00	0.00	0.11	0.26	0.63

Cuadro 2 Probabilidades de transición de las clases de precipitación efectiva entre 1975 y 2000

1975	2000				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Muy bajo	0.52	0.43	0.05	0.00	0.00
Bajo	0.00	0.77	0.23	0.00	0.00
Moderado	0.00	0.15	0.84	0.01	0.00
Alto	0.00	0.00	0.25	0.75	0.00
Muy alto	0.00	0.00	0.00	0.04	0.95

Evapotranspiración real media anual de agua

La matriz de transición (Cuadro 3) indicó que la mayor probabilidad de permanencia está en la clase Muy Bajo (92%); el 8% restante tiende a pasar a la clase Bajo. Las categorías con menor probabilidad de permanencia son Alto (69%) y Muy Alto (44%); la clase Alto tiene probabilidades de cambiar a Bajo (11%) y Moderado (15%); mientras que la clase Muy Alto puede cambiar a Moderado en 44%. Estos resultados indican menores pérdidas de agua por este proceso.

Déficit medio anual de agua

La matriz de probabilidades de transición (Cuadro 4) permitió observar cambios ligeramente negativos en este componente del balance hídrico regional. Las clases Bajo, Moderado, Alto y Muy Alto tienen las mayores probabilidades de permanecer como tales (81 y 82 %). Mientras que la clase Muy Bajo tiene sólo 44% de probabilidad de permanecer como tal, y puede cambiar a Bajo (52%) y Alto (3%). La clase Bajo puede cambiar a Moderado (18 %) y Alto (1%). La clase Muy Alto tiene 19 % de probabilidad de cambiar a Alto y la clase Alto puede cambiar a Moderado (9%).

Excedente medio anual de agua

Con relación al excedente medio anual, se puede indicar que existe un cambio ligeramente negativo en este componente del balance hídrico regional. Las clase Muy Bajo, Bajo y Moderado pueden pasar a la clase sin excedente (11, 14 y 3%, respectivamente); de igual forma, la clase Muy Alto puede cambiar a las categorías de Muy Bajo y Bajo (2%); la clase Moderado tiene un 22% de probabilidad de cambiar a la clase Bajo. Sin embargo, la clase de excedente Cero tiene el 3 y 5% de probabilidad de cambiar a las clases Muy Bajo y Bajo, respectivamente; la clase Moderado tiene el 2% de permanecer

como tal. Sin embargo, las clases Alto y Muy Alto tienen las probabilidades de permanencia más altas (97 y 96%; Cuadro 5).

Análisis del cambio de bordos y presas

El número de bordos, al igual que su superficie, se incrementaron en forma notoria en los últimos 25 años. En 1975 se cartografiaron 75 cuerpos de agua en esta clase, los cuales cubrían una superficie de 1 205 ha. Para el 2000 se identificaron 146 bordos con una superficie de 1 630 ha (Figura 17); es decir, en 25 años se incrementó la superficie de evaporación directa de cuerpos de agua en 26% y se duplicó el número de estructuras de retención de agua, aunque en su mayoría la extensión de éstas fue menor a 3 ha.

Los bordos se presentaron principalmente sobre planicies, mesas, laderas suaves y muy suaves convexas, laderas suaves rectilíneas y piedemontes no diferenciados. Las coberturas vecinas más frecuentes a la ubicación de bordos en 1975 correspondieron, en orden decreciente, a cultivos temporales y de riego, en el 2000 corresponden a cultivos de temporal, pastizales, arbustos, cultivos de riego, plantaciones de árboles y bosque. Se observó una diversificación de categorías vecinas para el 2000 y un cambio en el orden de prioridad de las unidades vecinas; este orden es coherente con la disminución de áreas de cultivo y permite interpretar que el incremento en el número de bordos no responde a una intensificación de las actividades agrícolas, sino más bien de las actividades pecuarias en la cuenca.

Cabe mencionar que la superficie del lago calculada para 1975 fue de 377 km², y en 2000 se registró una superficie de 306 km², lo cual indica que el cuerpo de agua del lago se redujo en alrededor del 19%; el antiguo cuerpo de agua se ha transformado en vegetación acuática (15%) y matorrales (1%) y ha sido utilizado para agricultura de riego y

temporal (3%) La vegetación acuática se ha incrementado como consecuencia del aporte de materia orgánica y fertilizantes transportados por los drenes, que alcanzan el lago en su porción central

Cuadro 3 Probabilidades de transición entre la evapotranspiración real de 1975 y 2000

1975	2000				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Muy bajo	0.92	0.08	0.00	0.00	0.00
Bajo	0.18	0.80	0.01	0.00	0.00
Moderado	0.04	0.17	0.79	0.00	0.00
Alto	0.00	0.11	0.15	0.74	0.00
Muy alto	0.00	0.00	0.33	0.00	0.67

Cuadro 4 Probabilidades de transición entre el déficit medio anual de agua entre 1975 y 2000

1975	2000				
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Muy bajo	0.45	0.52	0.03	0.00	0.00
Bajo	0.00	0.81	0.18	0.01	0.00
Moderado	0.00	0.03	0.82	0.15	0.00
Alto	0.00	0.00	0.09	0.81	0.10
Muy alto	0.00	0.00	0.00	0.19	0.81

Cuadro 5 Probabilidades de transición entre el excedente de agua medio anual entre 1975 y 2000

1975	2000					
	Cero	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Cero	0.92	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00
Muy bajo	0.11	0.86	0.03	0.00	0.00	0.00
Bajo	0.14	0.02	0.82	0.02	0.00	0.00
Moderado	0.03	0.01	0.22	0.73	0.00	0.00
Alto	0.00	0.01	0.00	0.02	0.97	0.00
Muy alto	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.96

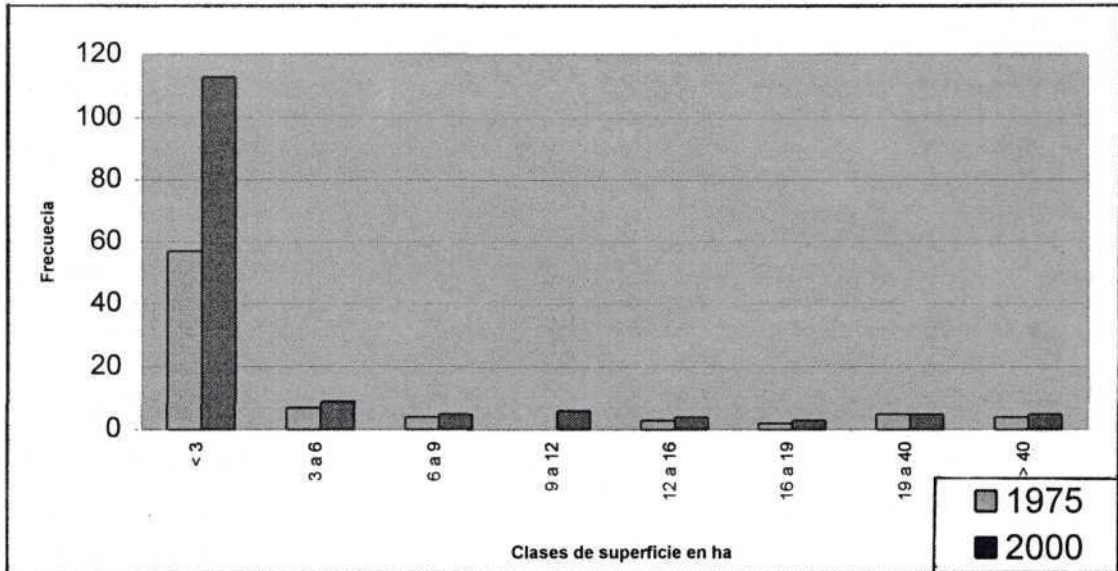


Figura 17. Frecuencia de bordos en la cuenca de Cuitzeo por clases de superficie en hectáreas.

CONCLUSIONES

Cambio del balance hídrico

Los cambios en los componentes del balance hídrico regional fueron relativamente pequeños. El análisis del cambio de los componentes del balance hídrico a nivel de formas de relieve confirmó que las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca mejoraron levemente. Sin embargo, las planicies y las formas transicionales (pie-demontes), presentaron un incremento en los valores de escorrentía, lo cual se explica por el incremento de la superficie ocupada por asentamientos humanos (incluidas en la clase áreas sin vegetación) y agricultura, que se asocian principalmente a esas formas de relieve.

Para ambos años existe una fuerte presión sobre el recurso hídrico en las zonas bajas de la cuenca. Aunque sus condiciones hidrológicas regionales se encuentran al menos igual que hace 25 años, es indiscutible que el lago de Cuitzeo presenta altos grados de

deterioro por contaminación y falta de agua, la cual no drena directamente al vaso del lago, por el uso inadecuado del agua en las zonas de riego y como consecuencia de un mayor uso en las ciudades, debido al incremento poblacional (Soto *et al.*, 1999; Acosta, 2002); especialmente el área urbana de la ciudad de Morelia, capital del estado, sextuplicó su superficie en 37 años (López *et al.*, 2001). La superficie ocupada por asentamientos humanos en la cuenca creció 284% en los últimos 25 años (López-Granados, 2002) y la población se incrementó de 380 870 habitantes en 1975 a 837 775 en 1995 (INEGI, 1970; 1995).

El análisis de la variación y distribución superficial de bordos indica que el número de éstos, al igual que su superficie, se incrementó en 26% y se duplicó el número de estructuras de retención de agua, aunque en su mayoría éstas fueron menores a 3 ha. El incremento de bordos, en este caso, no responde a una intensificación de las actividades agrícolas sino, más bien, de las actividades pecuarias en la cuenca.

En consecuencia, la disminución de la superficie del vaso del lago de Cuitzeo no está ligada a la degradación de laderas, producto de la deforestación, más bien es resultado de una disminución del agua en los cauces por el incremento poblacional que conlleva un incremento en el consumo de agua, así como por un uso inadecuado del agua para riego agrícola; un incremento de la cobertura acuática y subacuática que cubría 59 km² en 1975 aumentó a 96 km² en el 2000, lo cual ha casi cerrado la comunicación entre el vaso este y central del lago de Cuitzeo.

Fortalezas y limitaciones del modelo

En general la estimación de los componentes del balance hídrico a partir de información hidrometeorológica, conocimiento geomorfológico y el uso de técnicas de PR y SIG tiene limitaciones, las cuales han sido discutidas recientemente por Mendoza *et al.* (2002). Sin embargo, la integración de estas técnicas con un modelo de balance hídrico espacialmente distribuido, sobreposición cartográfica automatizada y de técnicas de análisis de dinámica de cambio, como es el caso de las matrices de transición, representa una alternativa viable para entender el efecto hidrológico del CCVUS en grandes superficies sin suficientes aforos y estaciones meteorológicas. El modelamiento para dos años permitió reconocer, de manera general, el cambio temporal de la distribución y cantidad de agua en laderas; cabe reconocer que el modelo espacialmente distribuido utilizado no evalúa directamente el balance hídrico en el cuerpo de agua del lago de Cuitzeo.

La comparación de los valores estimados en el balance hídrico para ambos tiempos es posible, ya que las estimaciones realizadas en los dos tiempos presentan un error con el mismo orden de magnitud; especialmente porque no existen evidencias de cambios significativos en la precipitación y temperatura en los últimos 75 años. Sin embargo, es

importante mencionar que las estimaciones realizadas con el modelo hidrológico ofrecen valores que se acercan a la realidad y de acuerdo a valores sobrestimados y subestimados por modelos presentes en la literatura (Arnell, 1999; Wood y Blackburn, 1984).

En este estudio, al igual que en el Himalaya (Sharma *et al.*, 2000), los resultados están basados en escenarios con alto grado de incertidumbre e información inadecuada para la validación de modelos. La falta de datos de campo para la modelación hidrológica es un problema común en la mayoría de los países subdesarrollados. El tipo de enfoque utilizado en este trabajo es útil cuando no se cuenta con datos de aforos que permitan validar los resultados obtenidos con el modelamiento espacialmente distribuido.

Lo anterior sugiere que, cuando se evalúa el efecto del CCVUS en grandes áreas pobremente aforadas, con la aplicación de modelos espacialmente distribuidos, sólo es posible obtener, en el mejor de los casos, una estimación de las tendencias entre la condición hidrológica de antes y después del CCVUS. La magnitud *per se* de los valores de magnitud pierde relevancia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Programa SIMORELOS (CONACyT), dentro del proyecto de investigación *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial de la cuenca de Cuitzeo*. Se agradece la colaboración en la construcción y edición de bases de datos a Vicente Salinas, Alejandra Acosta y Ergüin Cuevas. Agradecemos las sugerencias proporcionadas por dos referís anónimos. El primer autor agradece el apoyo económico proporcionado por el CONACyT y la UNAM a través de las becas de doctorado recibidas.

REFERENCIAS

- Acosta Villegas, A. (2002), *Crecimiento de los asentamientos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo y su consumo de agua, 1975, 2000*, tesis de licenciatura en Biología, Facultad de Biología, UMSNH.
- Anderson, J. R., E. E. Hardy, J. T. Roach y R. E. Witmer (1976), *A land use and land cover classification system for use with remote sensing data*, Geological Survey Professional Paper 964.
- Arnell, N. W. (1999), "A simple water balance model for simulation of streamflow over large geographic domain", *Journal of Hydrology*, 217, pp. 314-335.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000a), *Shared water resources information from space. New management opportunities or unwanted interference?*, Department of Water Resources and Environmental Studies, ITC, http://www.itc.nl/wres/basti_text.html.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000b), "SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey", *Journal of Hydrology*, 229, pp. 87-100.
- Beek, M. (1996), *Drainage pattern analysis and extraction of hydrologic properties from digital elevation models*, M.Sc. thesis in Land Resources and Management, Silsoe College, Cranfield University, Silsoe.
- Bergström, S. y L. P. Graham (1998), "On the scale problem in hydrological modeling", *Journal of Hydrology*, 211, pp. 235-265.
- Bhaduri B., M. Grove, C. Lowry y J. Harbor (1997), "Assessment of long-term, hydrologic effects of land use change. The curve number technique for calculating runoff is modified to estimate lost groundwater recharge", *Journal of American Water Works Association*, 89 (11), pp. 94-106.
- Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Dunne, T. y L. B. Leopold (1978), *Water in Environmental Planning*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, USA.
- Elkaduwa, W. K. B. y R. Sakthivadivel (1998), *Use of historical data as a decision support tool in watershed management: A case study of the Upper Nilwala basin in Sri Lanka*, Report 26, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- EPA (1995), *Watershed protection: a project focus*, Assessment and watershed division, Office of wetlands, oceans and watersheds, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Ersten, A. C. D. (1999), "Ecohydrological impact-assessment modelling: an example for terrestrial ecosystems in Nord-Holland, The Netherlands", *Environmental Modelling and Assessment*, 4, pp. 13-22.
- FAO (1976), *Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO: riego y drenaje*, núm. 24, ONU-FAO, Roma, Italia.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry (1979), *Groundwater*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., NJ.
- Gleick P. H. (1987), "The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento basin", *Water Resources Research*, 23 (6), pp. 1049-1061.
- Harbor, J. (1994), "A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology", *Journal of the American Planning Association*, 60 (1), pp. 95-108.
- Henderson-Sellers, A., R. E. Dickinson, T. B. Durbidge, P. J. Kennedy, K. McGuffie, y A. J. Pitman (1993), "Tropical deforestation: modeling local-to regional-scale climate change", *Journal of Geophysical Research*, 98 (D4), pp. 7289-7351.
- Hillel, D. (1998), *Environmental Soil Physics*, Academic Press, San Diego CA.
- INEGI (1971), *Carta de edafología. Puruándiro F14 C82*, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

- INEGI (1973a), *Carta de edafología. Acámbaro* F14 C84, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1973b), *Carta de edafología. Moroleón* F14 C83, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979a), *Carta de edafología. Cuitzeo* E14 A13, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979b), *Carta de edafología. Morelia* E14 A23, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979c), *Carta de edafología. Pátzcuaro* E14 A22, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979d), *Carta de edafología. Tzitzio* E14 A24, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979e), *Carta de edafología. Villa Escalante* E14 A32, escala 1:50,000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1979f), *Carta de edafología. Zinapécuaro* E14 A14, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1982a), *Carta de edafología. Coeneo de la Libertad* E14 A12, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1982b), *Carta de edafología. Villa Madero* E14 A33, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1983a), *Carta de edafología. Maravatío* E14 A15, escala 1:50 000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (1983b), *IX Censo General de Población, 1970*, Dirección General de Estadística, vol. II, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México, pp. 383-521.
- INEGI (1997), *Conteo de Población y Vivienda* 1995. *Resultados Definitivos. Michoacán*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, disco compacto.
- Jain, A., S. C. Rai y E. Sharma (2000), "Hydro-ecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya", *Catena*, 4, pp. 263-278.
- Jury, W. A., W. R. Gardner y W. H. Gardner (1991), *Soil Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Kite, G. W. (1993), "Application of a land class hydrological model to climate change", *Water Resources Research*, 29, pp. 2377-2384.
- Landon, J.R. (ed.; 1984), *Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the Tropics and Suptropics*, Booker Agriculture International Limited, Great Britain.
- López, E., G. Bocco, M. E. Mendoza y E. Duahu (2001), "Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico", *Landscape and urban planning*, 55 (4), pp. 271-285.
- López-Granados, E., M. Mendoza y A. Acosta (2002), "Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán", *Gaceta Ecológica*, 63 (en prensa).
- López-Granados, E. y G. Bocco (2001). "Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo", en Mendoza-Cantú, M. E., E. López-Granados y G. Boceo (2001). *Regionalización ecológica, conservación de recursos y ordenamiento territorial*, Informe final presentado al Programa SIMORELOS-CONACyT, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, México.
- Luenberger, D. G. (1979), *Introduction to dynamic systems. Theory, models & applications*, John Wiley & Sons.
- Mcguffie, K., A. Henderson-Sellers y H. Zhang (1998), "Modelling climate impacts of future rainforest destruction", en Malovey, B. K. (ed), *Human activities and the tropical rainforest*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.

- Meijerink, A. M. J., H. A. M. de Brouwer, C. M. Mannaerts y C.R. Valenzuela (1994), *Introduction to the use of Geographical information systems for practical hydrology*, UNESCO, International Hydrology Programme and ITC publication No. 23, Enschede, The Netherlands.
- Mendoza, M. E., G. Bocco y E. López-Granados, "Regionalización geomorfológica de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Bases para su ordenamiento territorial", en Barón, L, F. Peña y C. Ramírez, *La cuenca del lago de Cuitzeo: problemas y perspectivas de desarrollo*, Centro Regional Universitario Centro Occidente (CRUCO), UACH (en prensa).
- Mendoza, M. E., G. Bocco y M. Bravo, (2002a). "Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research", *Progress in Physical Geography*, 26 (3), pp. 319-338.
- Mendoza, M. E., G. Bocco, M. Bravo, C. Siebe y M. A. Ortiz, (2002b), "Modelación hidrológica espacialmente distribuida: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 47, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 36-58.
- Nikolaidis, N. P., H. L. Hu, C. Ecsedy y J. D. Lin (1993), "Hydrologic response of freshwater to climatic variability: model development", *Water Resources Research*, 29, pp. 3317-3328.
- Olivera, F. (1996), *Spatial distributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using geographic information systems*, Ph. D. Thesis University of Texas at Austin, <http://www.ce.utexas.edu/prof/olivera/disstn/>.
- Olsson, L y P. Pilesjo (1999), *Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment*, ITC Short Course of Environmental Modelling, <http://www.natgeo.lu.se/lennartweb>.
- Osman, B. E. T. (1996), *GIS-Hydrological modelling in arid lands. A geographical synthesis of surface waters for the African Red Sea region in the Sudan*, Ph.D. Thesis, Lund University, Sweden.
- Pasquaré, G., L. Ferrari, V. H. Garduño, A. Bibaldi y L. Vezzoli (1991), *Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, Mexico*, Map and Chart Series MCH072, Geological Society of America.
- Rind, D., C. Rosenzweig y R. Goldberg (1992), "Modelling the hydrological cycle in assessment of climate change", *Nature*, 358, pp. 119-121.
- Sahagian, D. (2000), "Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution", *Global and Planetary Change*, 25, pp. 39-48.
- SARH-CP (1991), *Manual de conservación del suelo y el agua*, SARH-CP-SPP, México.
- Schaumm, S.A. (1964), "Airphotos and water resources", *Trans. UNESCO Symposia Aerial Survey and integrated studies*, Toulouse, UNESCO, pp. 70-80.
- Serruto, C. R. (1993), *Una nueva fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Programa interinstitucional de Waru Waru*, Facultad de Ciencias, Puno, Perú.
- Sharma, K. V. P., C. J. Vorósmarty y B. Moore III (2000), "Sensitivity of the Himalayan hydrology to land use and climatic changes", *Climatic Change, AI*, pp. 117-139.
- Soto-Galera, E., J. Paulo-Maya, E. López-López, J. A. Serna-Hernández y J. Lyons (1999), "Environmental auditing: change in fish fauna as indication of aquatic. Ecosystem condition in río Grande de Morelia-lago de Cuitzeo Basin, México", *Environmental Management*, (24) 1, pp. 133-140.
- Thornthwaite, C. W. y J. R. Mather (1957), "Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance", *Publications in Climatology* 10, (3), Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Centeron, New Jersey.
- Verstappen, H. Th. y R. Van Zuidam (1991), *The ITC System of Geomorphologic Survey. A basis for the evaluation on natural resources and hazards*, ITC publication No. 10. Enschede, The Netherlands.

- 📖 Vörösmarty, C. J., B. Moore III (1991), "Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi river", *Surveys in Geophysics*, 12, pp. 271-311.
- 📖 Vörösmarty, C. J., B Moore III, A. L Grace, M. P Gildea, J. M Melillo, B. Peterson, E. B. Rastetter y P. A. Steudler (1989), "Continental scale models of water balance and fluvial transport: an application to South America", *Global Biogeochemical cycles*, 3 (3), pp. 242-265.
- 📖 Wood, M. K. y W. H. Blackburn (1984), "An evaluation of hydrologic soil groups as used in the SCS runoff method on rangelands", *Water Resources Bulletin*, 20, pp. 379-389.
- 📖 Xu, C. Y. y G. L. Vandewiele (1994), "Sensitivity of rainfall-runoff models to input errors and data length", *Hydrological Science Journal*, 39 (2), pp. 157-176.
- 📖 Xu, C. Y. (2000), "Climate change and hydrologic models: A review of existing gaps and recent research developments", *Water Resources Management*, 13, pp. 369-382.