

DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-10

Notas

Impacto del cambio de cobertura y uso de suelo y cambio climático en la respuesta hidrológica de la cuenca de la presa El Rejón mediante el uso de inteligencia artificial

Land use/land cover change and climate change impact on the hydrological response of El Rejón Dam watershed using artificial intelligence

Jassef Gerardo Simental-Nájera¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1082-0657>

Felipe Ignacio Arreguín-Cortés², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6577-6497>

Michelle Farfán-Gutiérrez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4948-1453>

Claudia Elizabeth Cervantes-Jaimes⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5104-6258>

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, jas521@hotmail.com



²Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México,
farreguin2011@gmail.com

³Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México,
farfanmichel@gmail.com

⁴Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, Monterrey, México,
celizacervantes@gmail.com

Autor para correspondencia: Jassef Gerardo Simental-Nájera,
jas521@hotmail.com

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo estimar el impacto potencial del cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) de la cuenca de aportación, así como el efecto del cambio climático en la precipitación para determinar la respuesta hidrológica de una cuenca de aportación y por consecuencia en el dimensionamiento de una obra hidráulica. En este análisis se determinó el gasto máximo de diseño de la presa El Rejón para el año 2053 mediante una técnica de inteligencia artificial, que se basa en el aprendizaje de información geoespacial histórica para desarrollar una proyección. Mientras que para considerar el efecto del cambio climático en la precipitación de la zona de estudio se utilizó el escenario CMIP5 con el modelo HADGEM2_ES. Los resultados indican un incremento de 9.48 % en el gasto debido al cambio de uso de suelo y cobertura vegetal, y un



aumento de hasta 41.52 % por efecto del cambio climático en la precipitación. Para contrarrestar este incremento de escurrimiento se concluye que es necesario reforestar la zona alta en la cuenca de la presa El Rejón debido a que la superficie del bosque está decreciendo y se induce pastizal. Este estudio presenta el primer análisis y proyección con base en inteligencia artificial para considerar el cambio de uso de suelo y su potencial impacto en el gasto de diseño de una obra hidráulica en México.

Palabras clave: obras hidráulicas, CCUS, autómatas celulares, cadenas de Márkov, cuarta revolución industrial, índice de precipitación, IPCC.

Abstract

The main objective of this study was to calculate the potential impact of the land use land cover (LULC) change, in addition to the climate change effect on precipitation on hydrological response of the dam watershed and therefore on the design of the hydraulic work. The maximum design discharge flow of El Rejón Dam for 2053 was estimated using cellular automata, an artificial intelligence technique which is based on historical geospatial information for the calibration of the parameters. While, to consider the effect of climate change on precipitation in the study area the CMIP5 scenario was used with the HADGEM2_ES model. The results indicate an increase of 9.48% in the maximum design flow due to LULC dynamics and an increase of up to 41.52% owing to the effect of climate change on precipitation. To counteract this increase, it is concluded that



the reforestation of the upper area of the watershed is necessary, since the forest area is decreasing and turning into grassland. This work presents the first analysis and projection based on artificial intelligence, to consider the change in land use and its potential impact on the maximum design flow of a hydraulic work in Mexico.

Keywords: Hydraulic works, LULC, cellular-automata, Markov chain, fourth industrial revolution, precipitation index, IPCC.

Recibido: 26/06/2020

Aceptado: 21/01/2022

Introducción

El cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) influye en gran medida en las características del escurrimiento de una cuenca, y afecta la disponibilidad de agua superficial y subterránea del área (Sajikumar & Remya, 2015). Cuando se trata de una cuenca de aportación a una presa, en muchos casos se incrementa el volumen de escurrimiento y las



dimensiones originales quedan por debajo de lo requerido a lo largo de su vida útil.

La intensidad del cambio de uso de suelo y sus consecuencias para el medio ambiente justifican el empleo de herramientas como la inteligencia artificial, con técnicas como los autómatas celulares (Wu *et al.*, 2006).

En inteligencia artificial, un autómata celular es un elemento que está dotado de controles autónomos que percibe su entorno, persiste durante un periodo de tiempo prolongado, se adapta a los cambios y es capaz de alcanzar objetivos diferentes (Coarite-Coque, 2008).

En la simulación de CCUS, además del uso de autómatas celulares, se utilizan cadenas de Márkov, que son una secuencia $X_1, X_2, X_3 \dots$ de variables aleatorias, donde el valor de X_n es el estado del proceso en el tiempo n y la distribución de probabilidad condicional de X_{n+1} en estados pasados es una función de X_n por sí sola, como se muestra en la Ecuación (1) (Basharin, Langville, & Naumov, 2004):

$$P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n, X_{n-1} = x_{n-1}, \dots, X_2 = x_2, X_1 = x_1) = P(X_{n+1} = x_{n+1} | X_n = x_n) \quad (1)$$

Donde:

X_i = el estado del proceso en el instante i .

La principal característica de las cadenas de Márkov en procesos estocásticos es que "carecen de memoria", lo que significa que la distribución de probabilidad del valor futuro de una variable aleatoria depende únicamente de su valor presente, siendo independiente de la historia de dicha variable (Norris, 1998). En el caso de modelos de simulación de CCUS, las cadenas de Márkov sirven para determinar la tasa de cambio entre dos mapas.

Modelos de simulación de CCUS

La estimación del escurrimiento en una cuenca, es decir, de su respuesta hidrológica para el diseño de obras hidráulicas se basa en datos hidrométricos, pluviométricos y sus características físicas. Dentro de las características físicas se incluyen el tipo y uso de suelo, que es representado por el parámetro llamado número de curva. En general, se considera que el CCUS, al igual que el tipo de suelo, mantiene sus propiedades durante la vida útil de la obra, cuando en realidad el cambio de cobertura y uso de suelo implica una tendencia a incrementar la impermeabilidad y a disminuir la capacidad de infiltración. Excluir este



cambio lleva a una subestimación del escurrimiento y de las dimensiones de las obras, de ahí la importancia de la modelación del CCUS.

Existen dos tipos de modelos de simulación de CCUS: los más simples basados en regresión y los que emplean transición espacial (Henríquez, Azócar, & Aguayo, 2006). Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de CCUS, lo que lo hace un tipo de simulación simple; mientras que los modelos basados en transiciones espaciales comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en las cadenas de Márkov y autómatas celulares, donde se asume de forma explícita que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central, lo que podría representar la mejor opción para simular un fenómeno dinámico (Reynoso, Valdez, Escalona, De-los-Santos, & Pérez, 2016).

El desarrollo de modelos espacio temporales en los cuales el estado o atributo de una determinada ubicación geográfica cambia a lo largo del tiempo como respuesta de un conjunto de conductores es un requisito fundamental para el modelado ambiental y, por lo tanto, abre una vía de posibilidades para la representación de los fenómenos dinámicos (Soares-Filho *et al.*, 2006).

Aun cuando se sabe que el CCUS es causado sobre todo por el crecimiento de la población humana y las altas tasas de consumo de recursos (Morales-Maqueda, 1995), hay diversos factores involucrados como en otros fenómenos dinámicos, por lo cual no existe un solo enfoque específico que determine o explique el CCUS. Así, elegir un modelo

depende de los objetivos de la investigación, llegando a utilizar más de uno si fuese necesario, por medio de la combinación y el uso de técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariantes (Verburg, Kok, Pontius, & Veldkamp, 2006).

Para los propósitos de este trabajo se eligió DINAMICA EGO versión 4.0, un *software* gratuito desarrollado en Brasil, que cuenta con amplias ventajas en la identificación de impulsores de cambio, cálculos de tasas de transición y monitoreo de las trayectorias en la simulación de escenarios de CCUS.

Índice de precipitación ante el cambio climático

El recurso más avanzado del que se dispone para el estudio del clima es el conjunto de modelos de circulación general de atmósfera y océano acoplados (GCMs) (IPCC, 2015). Estos modelos, basados en leyes fundamentales de la física, simulan una gran variedad de los procesos que ocurren en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales entre los diversos subsistemas climáticos. Dichos modelos poseen resoluciones espaciales variadas que se han venido refinando en el transcurso del

tiempo (ahora se dispone de resoluciones del orden de los 30" x 30"), que permiten su aplicación a escalas regionales (IPCC, 2015).

En México, los cambios más notables de precipitación se observan hacia la región del Pacífico centro y en el norte, con anomalías que van de -60 a -100 mm al año (Conde- Álvarez & Gay-García, 2008).

Otra variable indispensable en el escenario de cambio climático es el forzamiento radiativo, que en términos del IPCC es una perturbación externa impuesta al balance radiativo del sistema climático de la Tierra, que podría conducir a cambios en la precipitación y la temperatura (Erlick, Russell, & Ramaswamy, 2001).

Materiales y métodos

Zona de estudio: presa El Rejón

La presa el Rejón está localizada en el arroyo El Rejón (Figura 1), afluente del río Chuvíscar, al suroeste de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México.



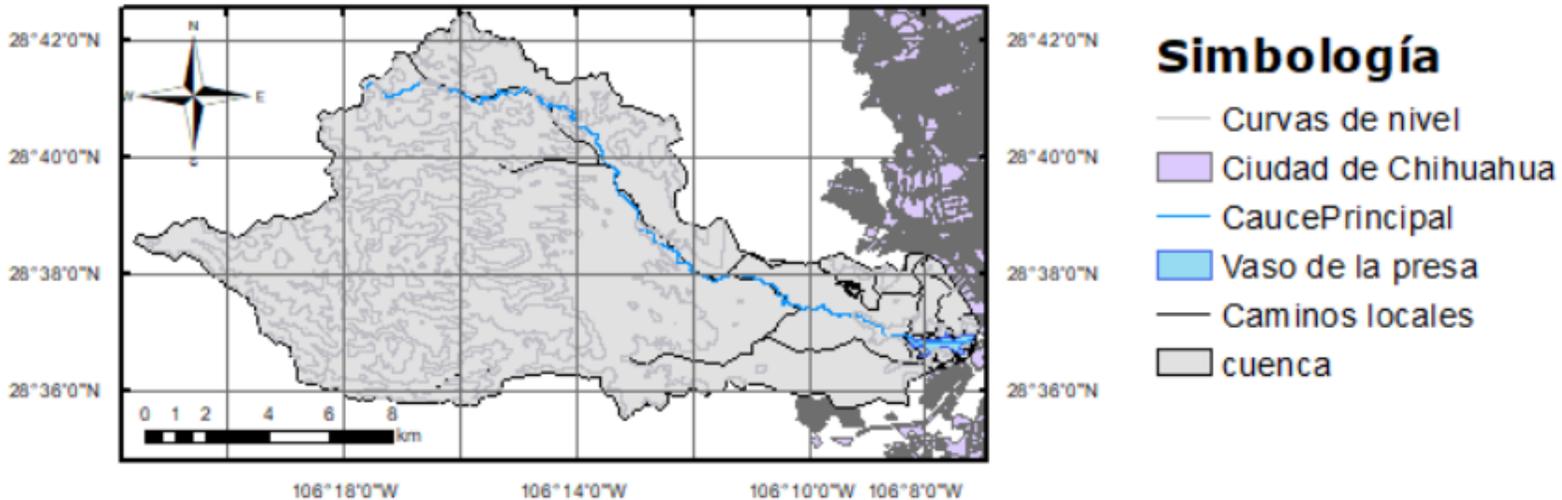


Figura 1. Cuenca de la presa El Rejón. Fuente: INEGI (2017).

Los trabajos de construcción de la presa se terminaron en 1966. La cortina cuenta con una altura de 33 m y una longitud de 300 m, además de un dique de 10 m de altura y 490 m de largo que cierra el embalse ubicado al sur de la cortina. La presa almacena 7.88 hm³ de agua (capacidad total); tiene una superficie de 0.58 km² al NAMO, y es alimentada por una cuenca de 149.69 km². La avenida para la cual se diseñó y construyó el vertedor es de 800 m³/s, que corresponde a un periodo de retorno de 10 000 años (Conagua, 2000).

La hidrografía se obtuvo a través del portal SIATL (simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas del INEGI) a partir de la red hidrográfica con escala 1:50 000; la longitud del cauce principal es de 26.06 km y tiene una pendiente media del 2.16 %.

La clasificación edafológica de la cuenca de estudio se muestra en la Figura 2. En el estado de Chihuahua, los tipos de suelo más abundantes son los regosoles (30%), calcisoles (26%), feozems (19%) y leptosoles (11%) (Conabio, 2008). Estos tipos muestran ciertos patrones de localización comunes, asociados con las características del relieve y de la cobertura vegetal (Pérez-Cutillas, Amado-Álvarez, Segovia-Ortega, Conesa-García, & Alarcón-Cabañero, 2019).

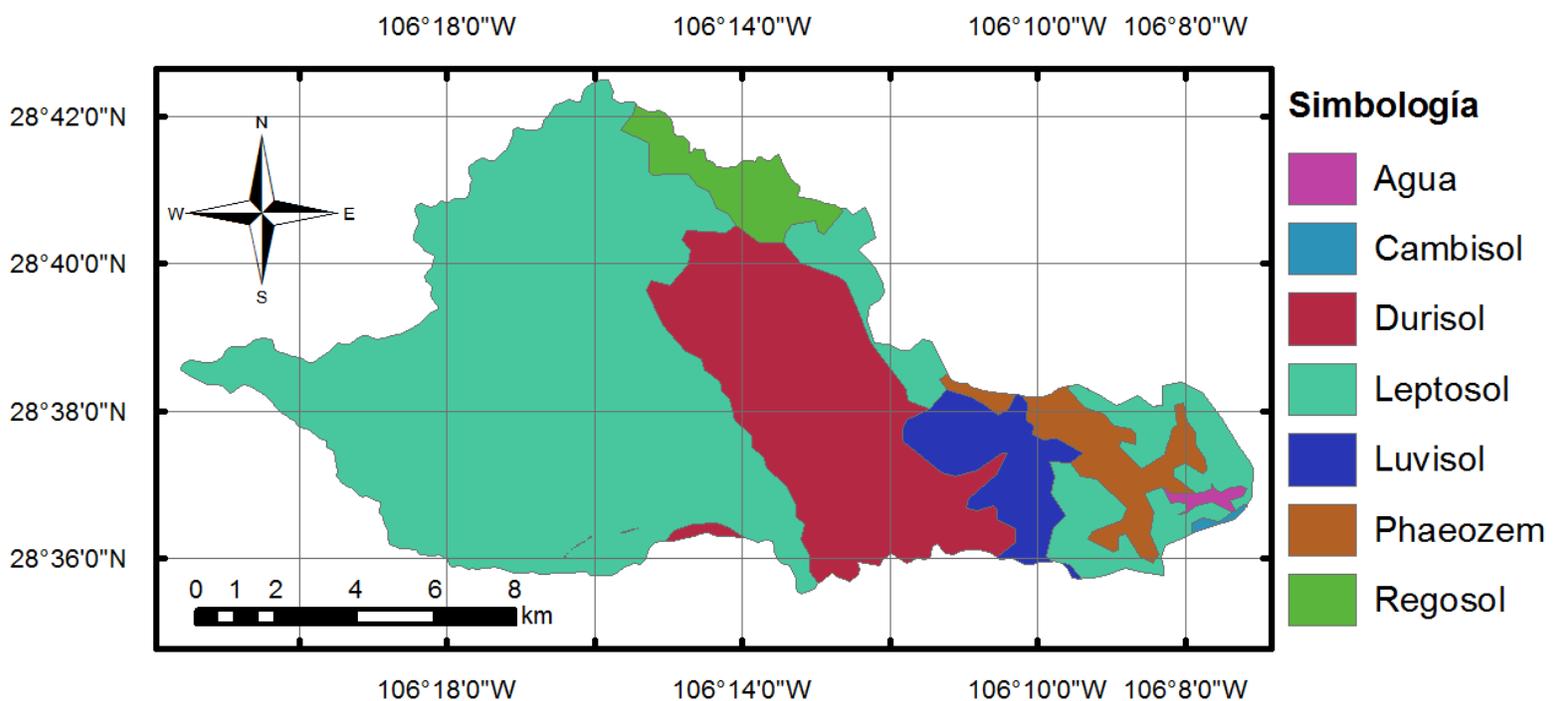


Figura 2. Edafología de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI (1994).

El conjunto de datos vectoriales de CUS serie VI se obtuvo por medio de imágenes del satélite LANDSAT 8, analizadas, procesadas y distribuidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para México en 2017, los cuales se presentan en la Figura 3.

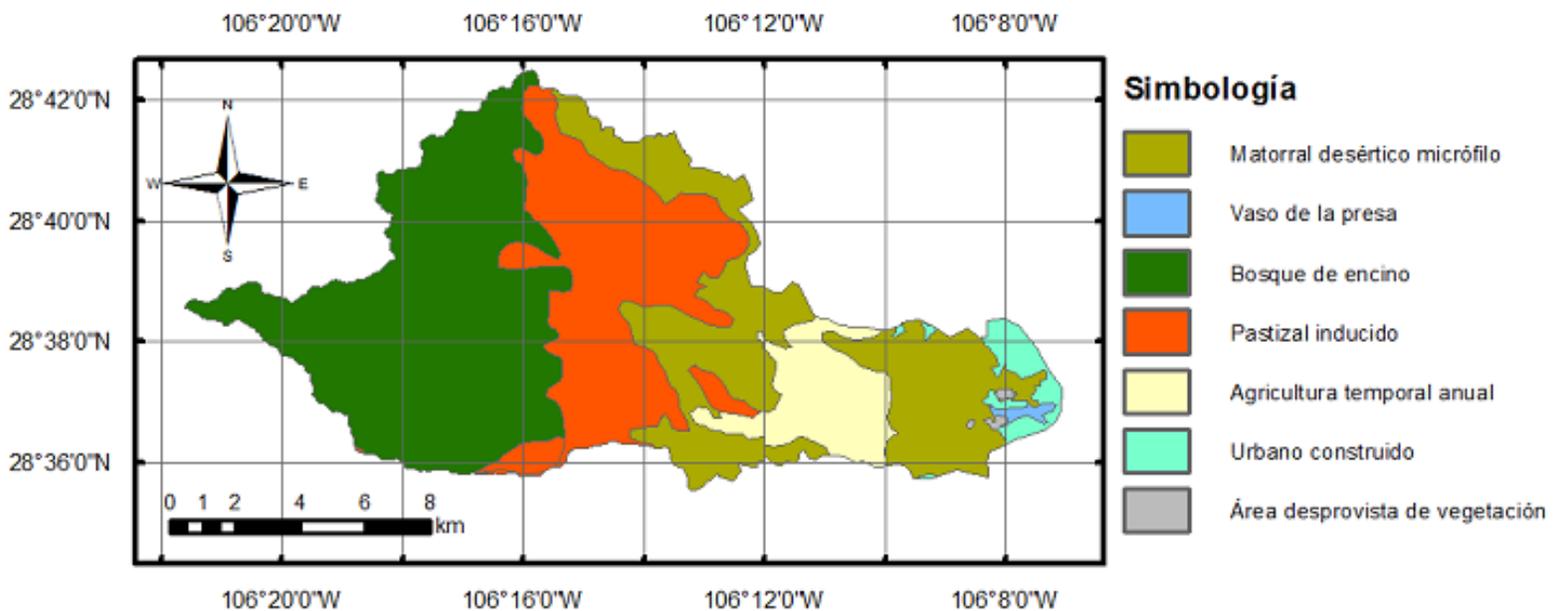


Figura 3. CUS de la cuenca El Rejón. Fuente: INEGI (2017).

En la cuenca de la presa El Rejón, la clase de CUS urbano construido tiene un área de 3.85 km², que representa el 2.57 % de toda la cuenca, zona en la que se espera una mayor impermeabilidad del suelo, es decir, mayor escurrimiento. El análisis lluvia escurrimiento de la cuenca se

realizó considerando tres estaciones climatológicas: Observatorio, Chihuahua y El Rejón.

Modelo de simulación de CCUS de la cuenca de la presa El Rejón

La estructura del modelo de simulación de CCUS (Figura 4) contempla tres etapas principales: calibración, simulación y evaluación. La calibración se obtiene utilizando dos mapas de CUS del mismo sitio en distinto tiempo CUS (t_1) y CUS (t_2); después se obtiene una matriz de transición que relaciona los mapas (t_1-t_2) y determina el porcentaje de cambio entre las clases de uso de suelo. Esta matriz es descrita como un sistema que se mueve en incrementos de tiempo discretos, en los que el valor de cualquier variable en un periodo de tiempo dado es la suma de porcentajes fijos de valores de todas las variables en el paso de tiempo anterior.

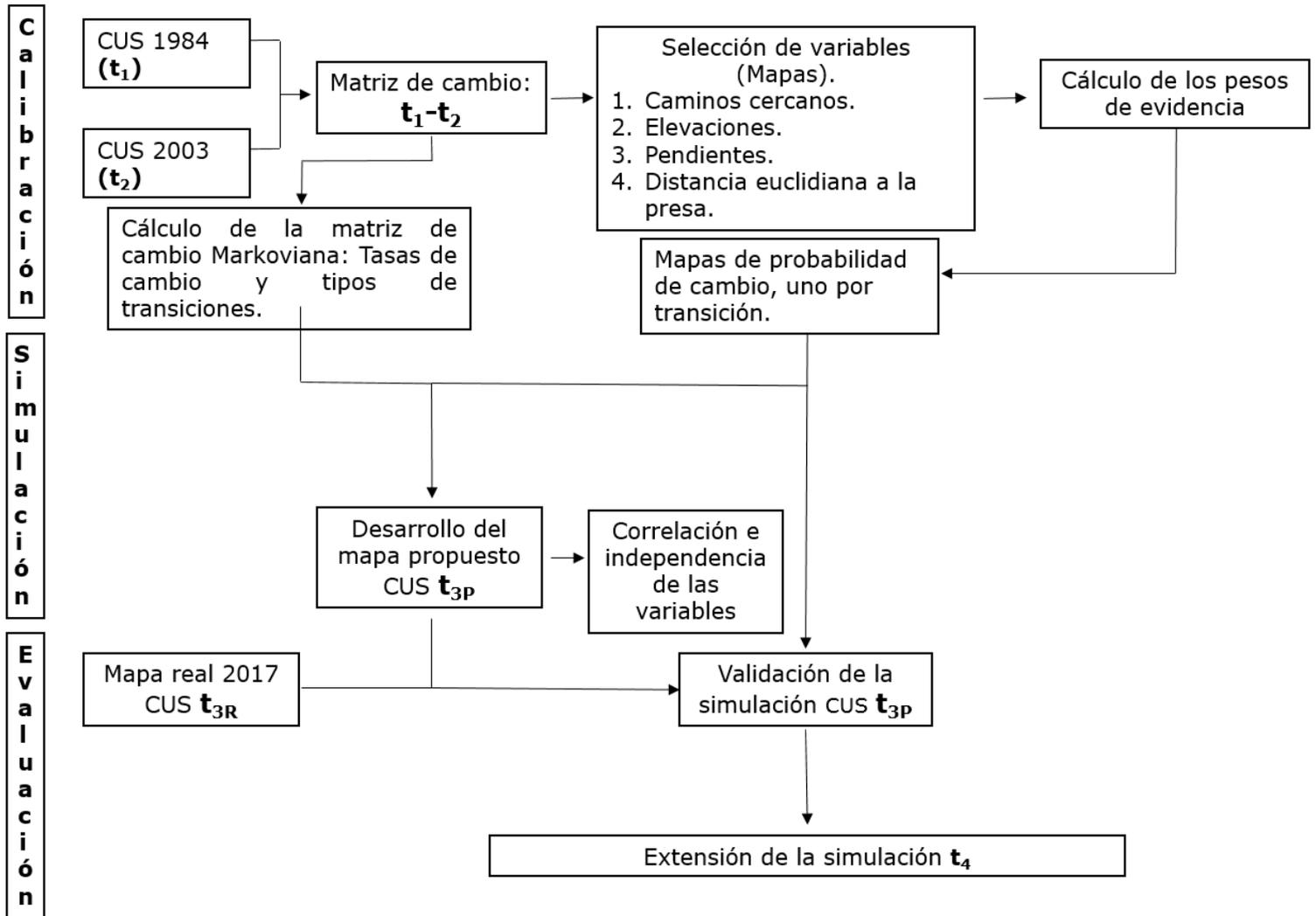


Figura 4. Estructura del modelo de cambio de cobertura y uso de suelo.
Fuente: elaboración propia.

Las tasas de incremento establecen la cantidad neta de cambios, es decir, el porcentaje de tierra que cambiará a otro estado (uso de la tierra

y cobertura vegetal) y, por lo tanto, se conocen como tasas netas (Soares-Filho *et al.*, 2006).

Además de utilizar los mapas CUS, es necesario considerar mapas cualitativos (selección de variables) que podrían incrementar las probabilidades de que una clase de CUS cambie a otra; a estas probabilidades se les llama pesos de evidencia, que consisten en un método bayesiano, en el que el efecto de una variable espacial en una transición se calcula independientemente de una solución combinada, lo que produce un mapa de probabilidad de transición que representa las áreas más favorables para un cambio de clases (Soares-Filho *et al.*, 2006).

Con la matriz de transición entre mapas (t_1-t_2) y los pesos de evidencia estimados se realiza la simulación, y se obtiene un mapa de cobertura y uso de suelo para t_3 , CUS (t_{3p}). A continuación se iteran manualmente los pesos de evidencia hasta que el mapa obtenido de la simulación CUS (t_{3p}) sea similar al mapa real CUS (t_{3R}).

Por último, se hace la evaluación del modelo, estructurado en dos partes. La primera consiste en validar el mapa de CUS t_{3p} comparándolo con el mapa de CUS (t_{3R}) a través de DINAMICA EGO, usando ventanas múltiples con una función de decaimiento constante y la segunda en proyectar el tiempo de simulación del modelo a un horizonte mayor (t_4).

Aplicación del IPcc a la precipitación máxima anual

A través del Atlas de Cambio Climático Digital de México (<http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/servmapas>) se puede visualizar el acoplamiento del escenario CMIP5, a los modelos disponibles, y obtener los metadatos requeridos para el análisis, lo cual desde el enfoque técnico es una herramienta útil con información precisa y regionalizada (Fernández-Esguiarte, Zavala-Hidalgo, Romero-Centeno, Conde-Álvarez, & Trejo-Vázquez, 2015).

Entre los metadatos que se obtienen es posible identificar los porcentajes de cambio de precipitación en las estaciones climatológicas de la zona de estudio, los cuales se utilizan como parámetro de precipitación ante el cambio climático (Rivas-Acosta, Güitrón-De-los-Reyes, & Ballinas-González, 2010) para modificar la precipitación máxima anual (Ecuación (2)):

$$PMA_{IPCC} = PMA + PMA * \left(\frac{IPCC}{100}\right) \quad (2)$$

Donde:



PMA_{IPCC} = precipitación máxima anual afectada por el índice de precipitación ante el cambio climático, mm.

PMA = precipitación máxima anual, mm.

IPcc = índice de precipitación ante el cambio climático, adimensional.

Resultados

La construcción del modelo de CCUS de la cuenca El Rejón se realizó con base en los mapas correspondientes a los años 1984 (CUS t_1) y 2003 (CUS t_2) y para la validación del modelo se usó el mapa del año 2017 (CUS t_{3R}), como se muestra en la Figura 5 (a, b, c). Una revisión visual muestra que las clases de CUS urbano construido y de agricultura temporal tienden a crecer; sin embargo, es necesario cuantificar ese cambio, para lo cual se debe obtener una matriz de transición.

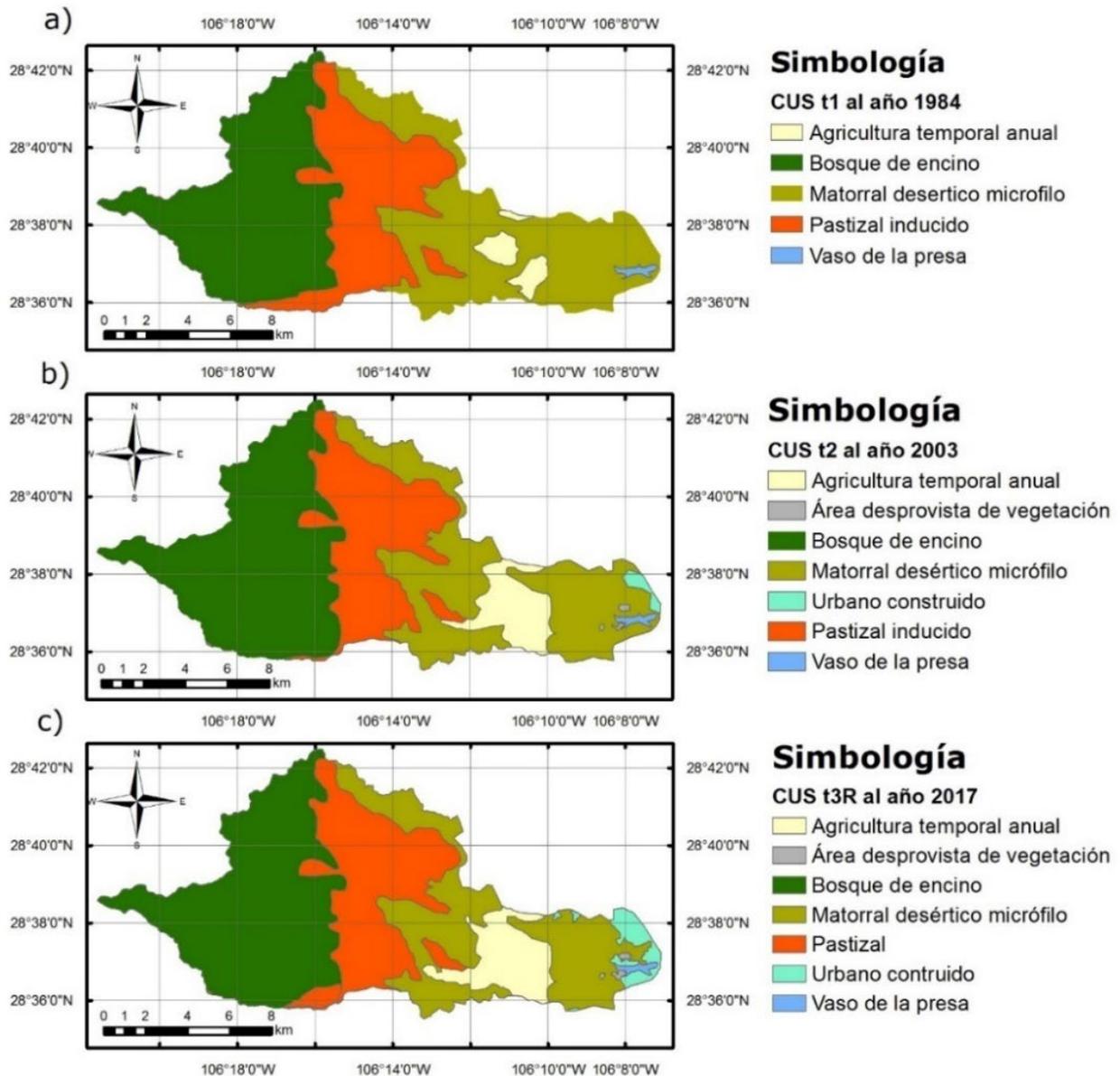


Figura 5. Mapas de CUS correspondientes a los años 1984 (a), 2003 (b) y 2017 (c) de la cuenca El Rejón, Chihuahua, México. Fuentes: INEGI (1984), INEGI (2003) e INEGI (2017).

En la Tabla 1 se muestran las tasas de transición entre los mapas de CUS (t_1) y (t_2) generados a partir de DINAMICA EGO. Las mayores tasas de transición (de = renglón; a = columna) ocurren de la clase de 1 a 6 con una tasa de 2.44 % anual; de 1 a 7 con una tasa anual de 0.63 %; de 1 a 5 con una tasa anual de 0.67 %, y de 3 a 4 con una tasa anual de 0.64 %.

Tabla 1. Matriz de transición de 19 años para los mapas CUS de los años 1984 y 2003.

De/a		1	2	3	4	5	6	7
		Matorral desértico micrófilo	Agua	Bosque de encino	Pastizal natural	Agricultura temporal anual	Urbano construido	Área desprovista de vegetación
1	Matorral desértico micrófilo	XXXX	--	--	0.0041228	0.0067243	0.0244602	0.0063069
2	Agua	--	XXXX	--	--	--	--	--
3	Bosque de encino	--	--	XXXX	0.006429	--	--	--
4	Pastizal natural	0.0028693	--	0.0062571	XXXX	0.0001460	--	--
5	Agricultura temporal anual	0.0027627	--	--	--	XXXX	--	--
6	Urbano construido	--	--	--	--	--	XXXX	--
7	Área desprovista de vegetación	--	--	--	--	--	--	XXXX

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 6, Figura 7, Figura 8 y Figura 9 se muestran los mapas cualitativos que se usaron como variables en el caso de estudio. La variable de caminos locales (Figura 6) se usó debido a que éstos son la antesala al uso de suelo urbano construido. El modelo digital de elevaciones (Figura 7) y el mapa de pendientes (Figura 8) en conjunto sugieren el uso antrópico de áreas en llano, así como la deforestación de áreas con mayor pendiente. Por último, el mapa de la distancia euclidiana a la presa (Figura 9) representa la probabilidad de cambio de uso de suelo en relación con la cercanía al vaso; esto se puede observar en los mapas CUS t_1 y t_2 , donde gran parte de lo que era matorral desértico pasó a ser usado para agricultura temporal.

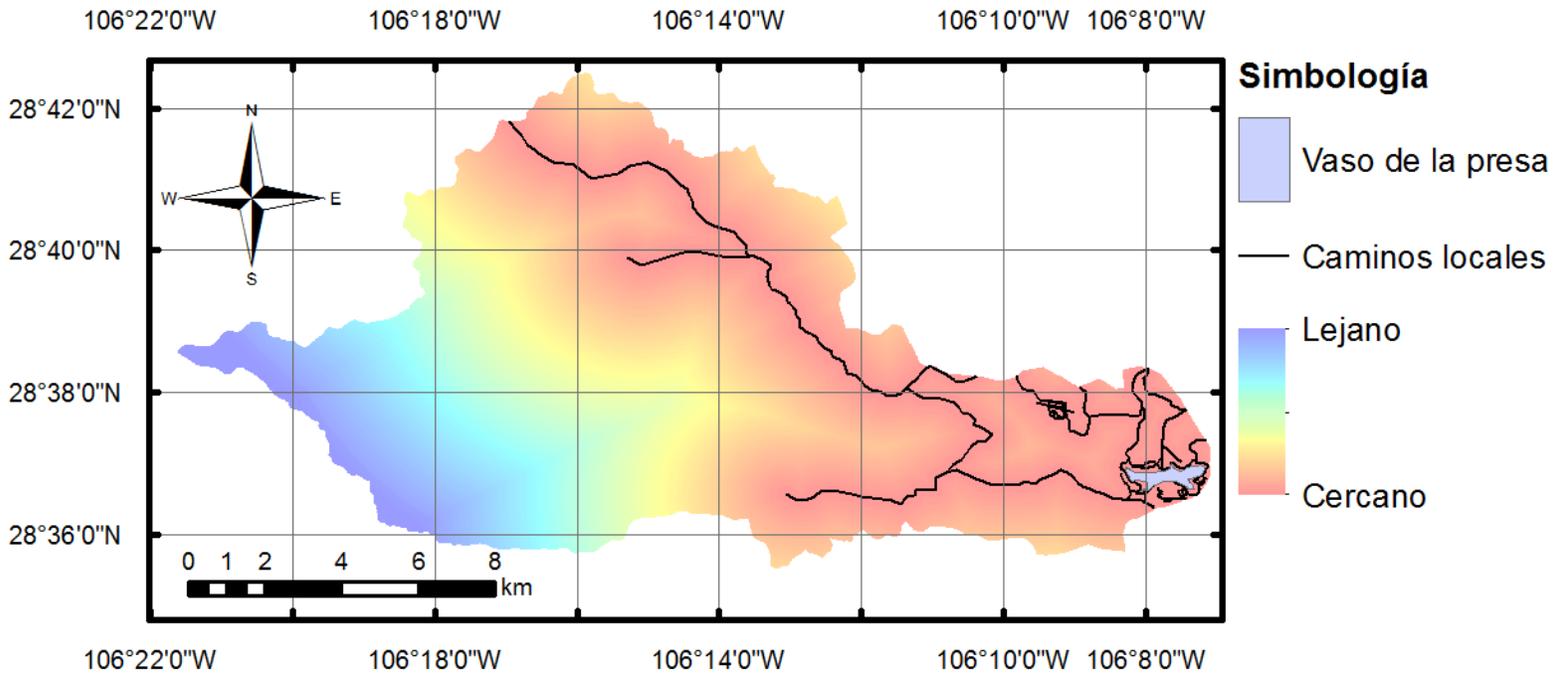


Figura 6. Mapa de caminos locales y rurales de la cuenca El Rejón, Chihuahua, México. Fuente: elaboración propia con datos del INEGI (2017).

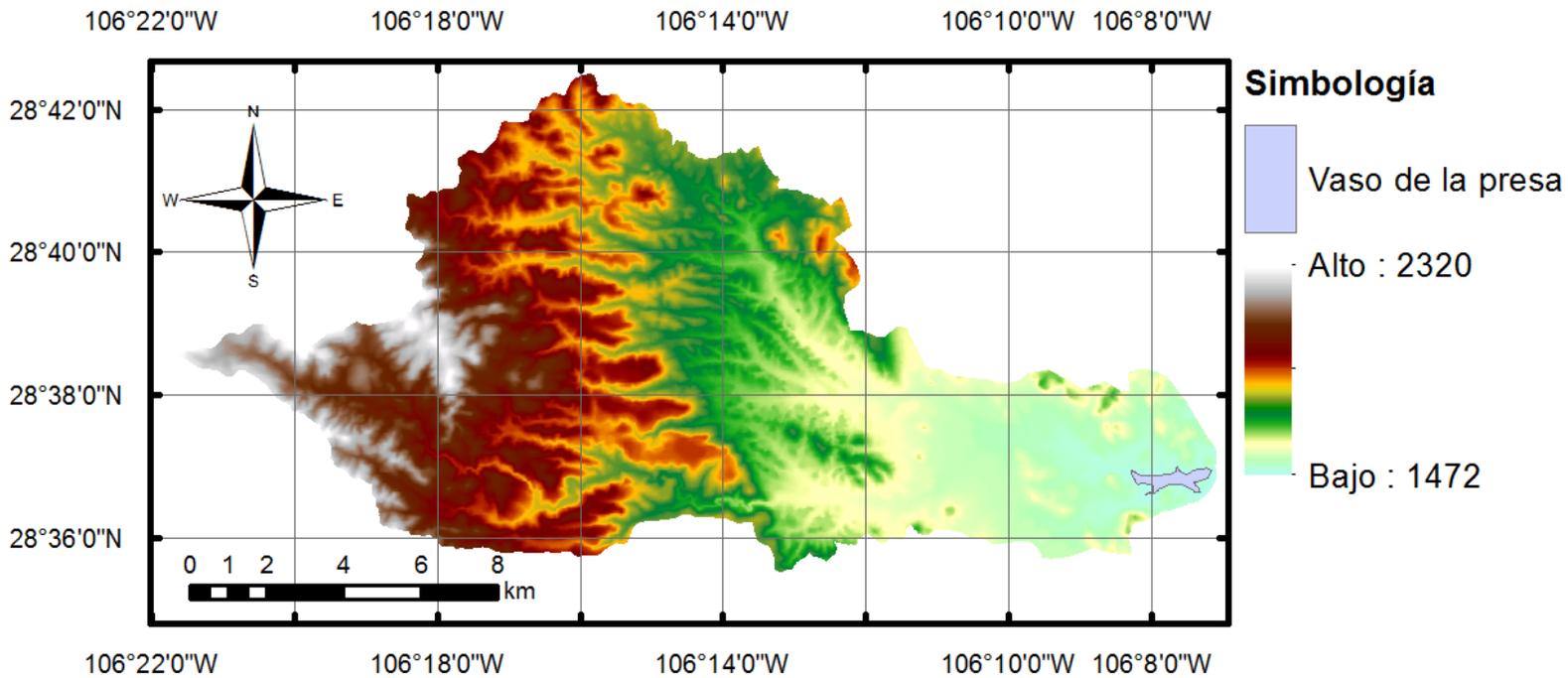


Figura 7. Modelo digital de elevación de la presa El Rejón, Chihuahua, México. Fuente: elaboración propia con datos de CLICOM (2018).

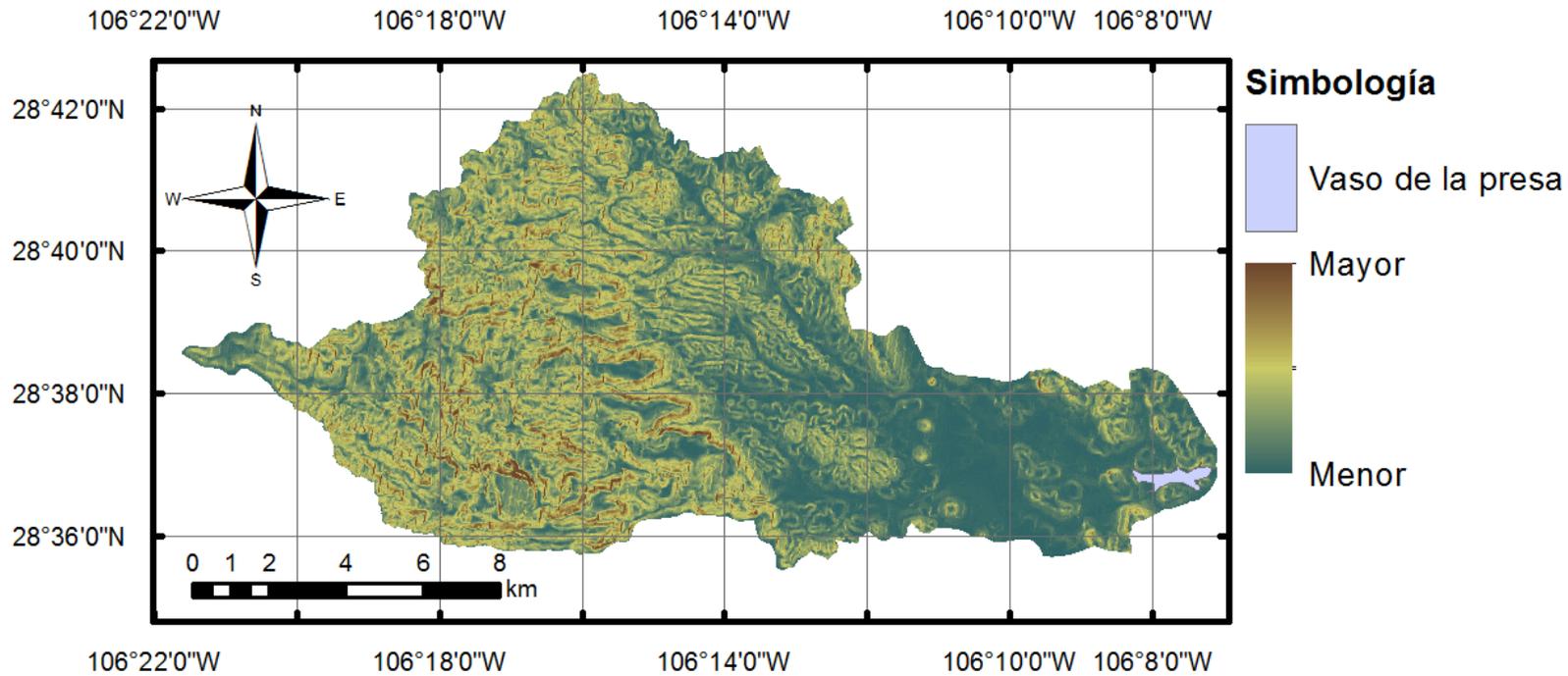


Figura 8. Mapa de pendientes presa El Rejón, Chihuahua, México.
Fuente: elaboración propia con información del INEGI (1994).

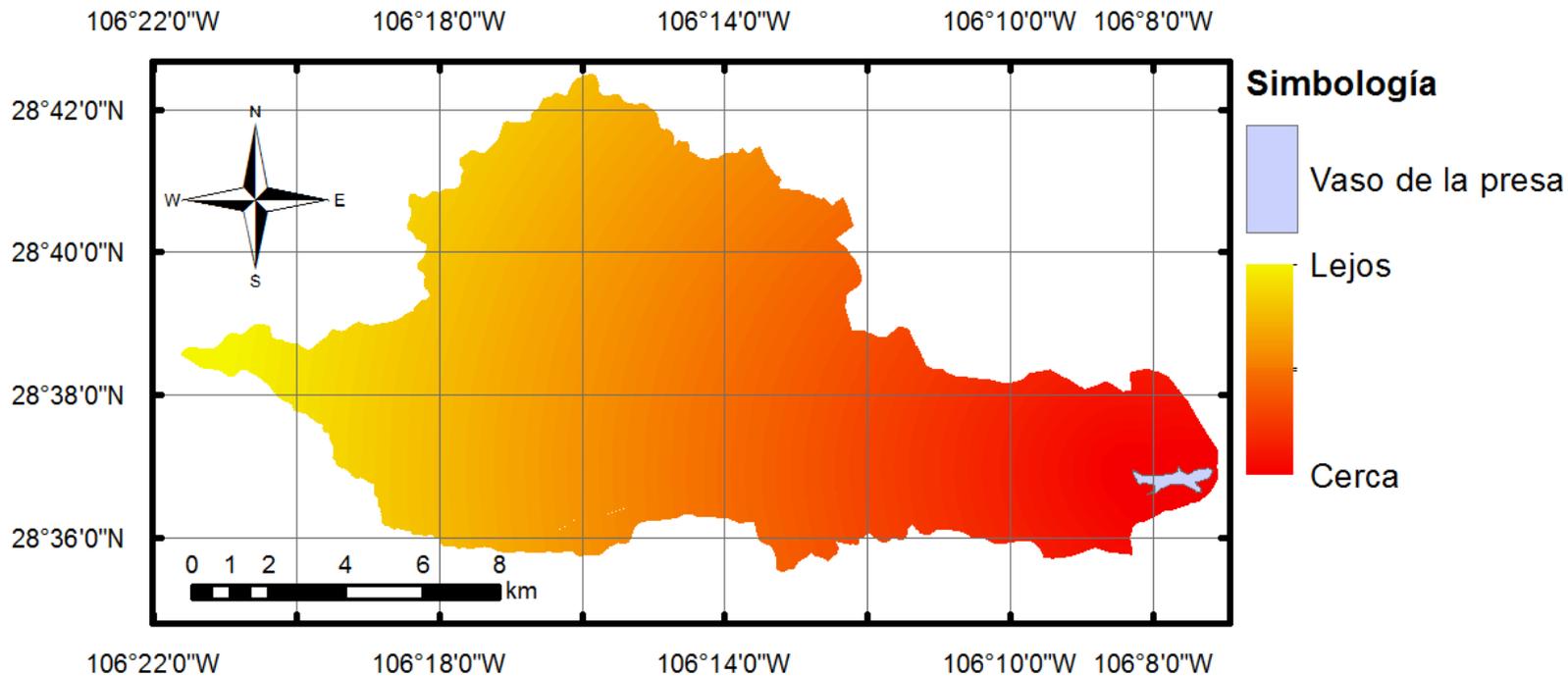


Figura 9. Mapa de distancia euclidiana a la presa El Rejón, Chihuahua, México. Fuente: elaboración propia con datos vectoriales del INEGI (1994).

DINAMICA EGO realiza pruebas de pares para mapas categóricos con el fin de probar el supuesto de independencia. Los métodos empleados son Cramer, la prueba de Contingencia y la prueba de Información Conjunta de Incertidumbre (Delaneze & Setti-Riedel, 2018).

Los resultados se muestran en la Tabla 2, donde la mayor independencia sería igual a 0 y la mayor correlación equivale a 1.

Tabla 2. Independencia de los mapas para el modelo de CCUS de la cuenca El Rejón, Chihuahua, México.

De	A	Primera variable	Segunda variable	Cramer	Contingencia	Incertidumbre
1	5	Caminos/distance_to_1	MDE/layer_0	0.30	0.67	0.26
1	5	Caminos/distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.15	0.42	0.06
1	5	Caminos/distance_to_1	distance_inicial/distance_to_2	0.25	0.59	0.18
1	5	MDE/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.19	0.55	0.13
1	5	MDE/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.31	0.78	0.44
1	5	Mapa_Pendientes/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.16	0.49	0.10
1	6	Dist_Euclidiana/layer_0	Caminos/distance_to_1	0.32	0.58	0.19
1	6	Dist_Euclidiana/layer_0	MDE/layer_0	0.59	0.80	0.46
1	6	Dist_Euclidiana/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.29	0.45	0.12
1	6	Dist_Euclidiana/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.62	0.88	0.74
1	6	Caminos/distance_to_1	MDE/layer_0	0.39	0.66	0.31
1	6	Caminos/distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.21	0.35	0.08
1	6	Caminos/distance_to_1	distance_inicial/distance_to_2	0.33	0.59	0.21
1	6	MDE/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.32	0.48	0.15
1	6	MDE/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.60	0.80	0.51
1	6	Mapa_Pendientes/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.27	0.43	0.12
1	7	Caminos/distance_to_1	MDE/layer_0	0.39	0.66	0.31
1	7	Caminos/distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.20	0.41	0.07
1	7	Caminos/distance_to_1	distance_inicial/distance_to_2	0.32	0.58	0.21
1	7	MDE/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.30	0.56	0.14
1	7	MDE/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.58	0.79	0.51
1	7	Mapa_Pendientes/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.25	0.52	0.11
3	4	Caminos/distance_to_1	MDE/layer_0	0.40	0.66	0.23
3	4	Caminos/distance_to_1	Mapa_Pendientes/layer_0	0.26	0.41	0.06
3	4	Caminos/distance_to_1	distance_inicial/distance_to_2	0.25	0.58	0.13
3	4	MDE/layer_0	Mapa_Pendientes/layer_0	0.27	0.42	0.09
3	4	MDE/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.48	0.73	0.39
3	4	Mapa_Pendientes/layer_0	distance_inicial/distance_to_2	0.27	0.42	0.08

Fuente: elaboración propia en el *software* DINAMICA EGO.

Los modelos espaciales requieren una comparación dentro de un contexto de vecindad, porque incluso los mapas que no coinciden exactamente celda por celda podrían presentar patrones similares y una concordancia espacial dentro de una cierta celda de cambio (Soares-Filho *et al.*, 2006).

En la validación del modelo de simulación de CCUS se emplea una función de decaimiento constante dentro de un tamaño de ventana variable. En el entendido de que una visualización de ventana de 1 x 1 es el total del terreno mostrado en el mapa, equivalente a un rectángulo de 23.64 x 12.91 km para la zona de estudio, entre más ventanas existan la amplitud de cada una tendrá una dimensión menor. La comparación con ventanas cada vez más pequeñas para determinar qué tanta similitud existe entre los mapas se hace hasta que aunque se incremente el número de ventanas la similitud no cambie.

Se analizó hasta una resolución de 101 x 101 ventanas (234.06 x 127.82 m), pues se observó que la diferencia de mínima similitud entre los mapas va disminuyendo hasta llegar a 0.001, por lo que ya no es necesario aumentar la resolución del análisis. Además, que la diferencia previa es de 0.004, lo que indica que el mapa CUS (t_{3P}) tiene una similitud de 0.812 con respecto al mapa CUS (t_{3R}), que se representa como 81.2 % de similitud. Piontekowski, Souza-Da Silva, Huamán-Mendoza, De-Souza-Costa y Campos (2012) sugieren que, en la validación del modelo de simulación, la similitud por encima de 50 % entre los mapas

comparados es satisfactoria, por lo que el porcentaje de 81.2 % de la validación del modelo de simulación de CCUS de la cuenca de la presa El Rejón es aceptable.

En la Figura 10 se presenta el mapa CUS t_4 , resultado de ampliar el horizonte de modelación a 50 años a partir del mapa CUS (t_2). El periodo de 50 años representa la vida útil de la obra hidráulica, que es el mínimo lapso durante el que se espera cumpla con la regulación de avenidas.

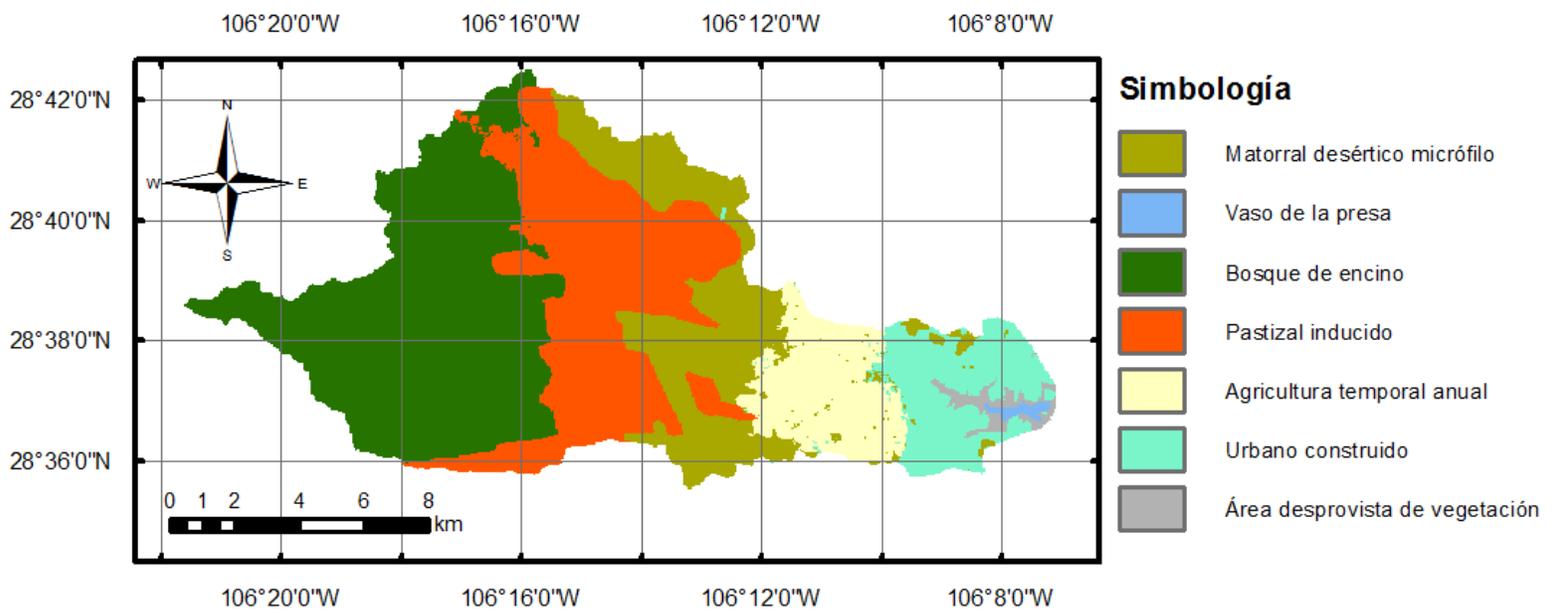


Figura 10. Mapa CUS (t_4) resultado de la modelación de simulación de CCUS de la cuenca presa El Rejón, Chihuahua, México, año 2053.

Fuente: elaboración propia con DINAMICA EGO.

En la Tabla 3 se muestra la diferencia entre CUS (t_4) y CUS (t_{3R}), es decir, entre las condiciones registradas en 2017 y las estimadas para 2053. De acuerdo con este mapa, la región de matorral desértico micrófilo es la que tendrá el decremento más significativo (12.138 km²), mientras que la clase urbano construido es la que presentará mayor crecimiento (9.837 km²). Esta misma tendencia se observó en el periodo 1984-2017, al inicio sin presencia de la clase urbano construido; luego, en CUS (t_2) se observa que inicia y por último en CUS (t_{3R}) se extiende en la zona alrededor del vaso.

Tabla 3. Diferencia entre el mapa de CUS (t_{3R}) y (t_4).

Uso de suelo y cobertura vegetal	Área, km ²		Diferencia t_4-t_{3R} , km ²
	2017 t_{3R}	2053 t_4	
Matorral desértico micrófilo	38.122	25.984	-12.138
Agua	0.581	0.581	0
Bosque de encino	57.9	53.643	-4.257
Pastizal inducido	36.63	39.565	2.935
Agricultura temporal anual	12.086	14.43	2.344
Urbano construido	3.851	13.688	9.837
Área desprovista de cobertura vegetal	0.52	1.799	1.279
Total	149.69	149.69	

Fuente: elaboración propia.

Este modelo es capaz de generar mapas año por año hasta un horizonte temporal máximo de 100; sin embargo, a mayor horizonte de tiempo entre el mapa base y el pronóstico, se genera más incertidumbre y probabilidad de discordancia con la realidad.

Precipitación máxima anual afectada por el IPcc

La obtención del gasto máximo de diseño (GMD) de una obra hidráulica implica la consideración de los valores máximos de precipitación, por tal motivo se acopló al escenario CMIP5 el modelo HADGEM2_ES regionalizado a 30"x30" con un forzamiento radiativo de 8.5 (el más alto), y se eligió el futuro medio (2045-2069) debido a que se adecua al estudio, dado que la proyección de CCUS corresponde al año 2053.

Se obtuvo el porcentaje de cambio de precipitación del modelo HADGEM2-ES en periodos mensuales (Tabla 4), el cual se utilizó como IPcc promedio para cada mes de lluvia solo en los meses en los que se registró la PMA de la cuenca.

Tabla 4. Resumen de los IPcc obtenidos para la cuenca de aportación a la presa El Rejón, Chihuahua, México.

Mes	IPcc %	Mes	IPcc %
Enero	-67.80	Julio	-8.51
Febrero	-100.00	Agosto	4.20
Marzo	-82.61	Septiembre	-11.30
Abril	-76.09	Octubre	91.32
Mayo	-46.40	Noviembre	-65.17
Junio	-2.77	Diciembre	-26.79

Fuente: elaboración propia.

Cálculo del gasto máximo de diseño

Con la finalidad de determinar GMD asociado con diferentes periodos de retorno, se aplicaron los métodos de Chow, hidrograma unitario triangular y racional a la cuenca de estudio. Se eligió el método racional, ya que mediante éste se obtuvo el valor más próximo (794.30 m³/s) al de diseño actual de la presa (800 m³/s), correspondiente a un Tr de 10 000 años.

En la Tabla 5 se muestran los gastos relacionados con diferentes periodos de retorno, considerando este método y la CUS registrados en 2017 (CUS t_{3R}).

Tabla 5. Resumen de la estimación del GMD del mapa de CUS (t_{3R}) para la presa El Rejón, Chihuahua, México.

Tr, años	GMD, m ³ /s 2017		
	Chow	HUT	Racional
10	100.91	61.42	180.46
25	138.25	87.47	250.33
50	168.00	108.7	319.87
100	199.01	130.93	381.71
1,000	309.88	212.4	589.57
10,000	429.97	302.11	794.30

Fuente: elaboración propia.

Con el propósito de comparar el efecto potencial del CCUS y el IPcc en el diseño del embalse, se determinó el GMD aplicando el método racional para el mapa de CUS t_4 en ambos casos. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.

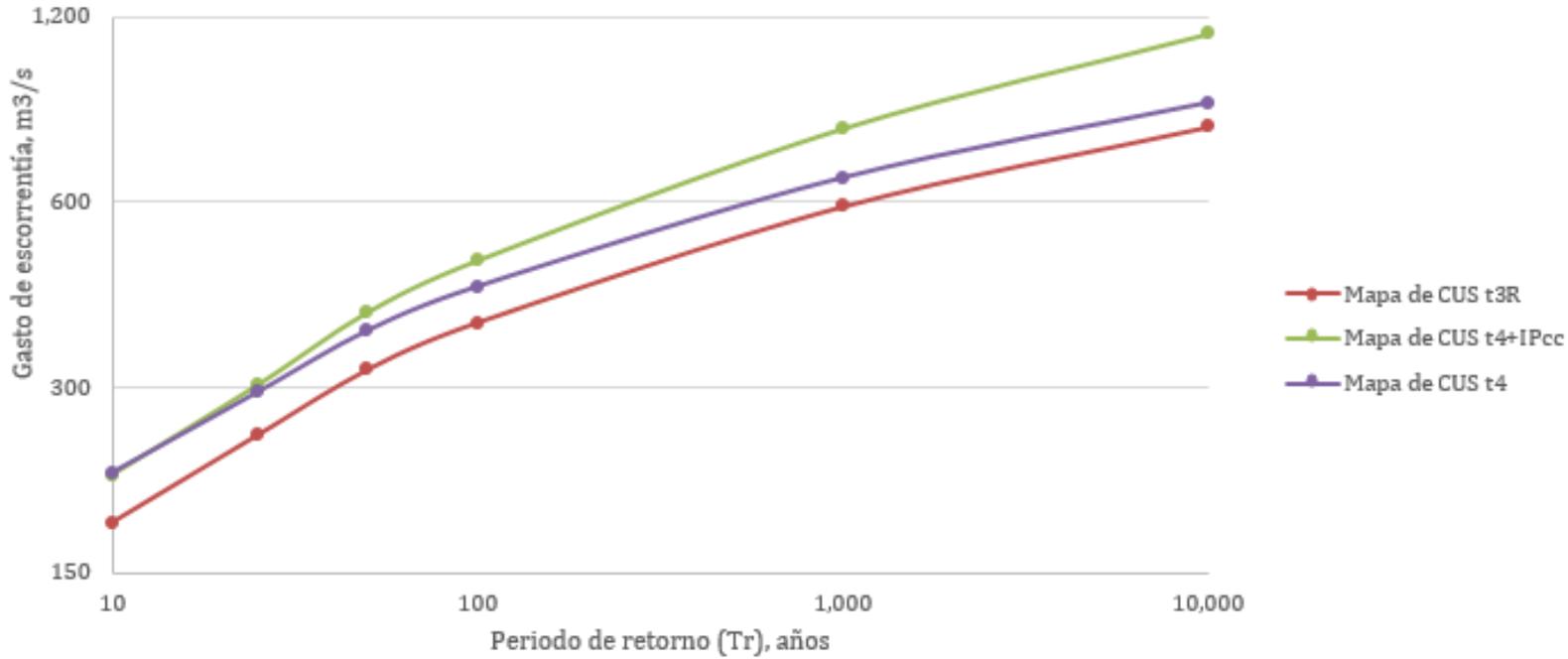


Figura 11. Comparación logarítmica del cálculo del GMD para la presa El Rejón, Chihuahua. Fuente: elaboración propia.

De presentarse en 2053, las características de uso de suelo y cobertura vegetal resultantes de la modelación, los resultados de la estimación del GMD para la presa El Rejón para ese año muestran que éste podría incrementarse en 9.48 %, y si además se considera el efecto del cambio climático en la precipitación, podría aumentar hasta 41.52 %; en ambos casos con respecto a los 800 m³/s con el que se diseñó la presa (Figura 11).

Discusión

Entre las características físicas de una cuenca con influencia en el escurrimiento, el CUS es la que presenta un cambio más acelerado (regularmente por causas antrópicas). Estos cambios se pueden presentar durante la vida útil de una obra hidráulica, fenómeno de interés para quienes se encargan del diseño, rehabilitación y operación principalmente de presas.

Para el caso de estudio, este cambio puede observarse en los mapas de la Figura 5 (b y c) y Tabla 1; el área de suelo urbano construido (el de más alta impermeabilidad) se incrementa en un 270 %. También se observa que en el periodo 2003-2017, el área de bosque decreció un 3 %, que se convirtió en pastizal. Mientras que el matorral desértico micrófilo decreció un 10 %, área que cambió a uso para agricultura temporal.

En la CUS (t_4) (Figura 10) destacan los incrementos respecto a la CUS (t_{3R}) (Figura 9c) del uso urbano construido (255 %), el uso de agricultura temporal (20 %) y suelo desprovisto de vegetación (246 %). El bosque de encino que se encuentra en la región más alta de la cuenca y contribuye a la disminución de los escurrimientos en la región con

pendientes más pronunciadas de acuerdo con el mapa correspondiente (Figura 8) presentó una reducción de 7 % en este periodo.

El GMD 2053, en el que intervino el mapa CUS (t_4) resultante de la modelación, tuvo un incremento de 9.5 % (75.31 m³/s), con respecto al utilizado en el mapa CUS (t_{3R}) de 2017. Mientras que al aplicar el IPcc al CUS (t_4), el GMD incrementó 41.5% con respecto al de 2017.

Aunque es deseable hacer una estimación para el periodo completo correspondiente a la vida útil de la obra hidráulica a diseñar, con la metodología presentada es posible realizar una proyección de CCUS hasta de 100 años, tal estimación tendría una incertidumbre mayor al análisis aquí presentado.

En la Tabla 4, los valores son negativos en su mayoría, es decir, en los meses de estiaje se espera menor precipitación debido al cambio climático. Sin embargo, destaca el valor para octubre por su magnitud, en plena temporada de lluvias, que como se ve en los resultados del gasto sí incrementa el volumen de escurrimientos.

Conclusiones

Los resultados de la modelación demuestran que los cambios potenciales en la CUS de una cuenca de aportación a lo largo de la vida útil de una obra tienen un efecto directo en el volumen de escurrimiento. Para



análisis de este tipo, es conveniente considerar que los periodos de operación de las presas en México comúnmente exceden la vida útil estimada en el diseño. En cuanto al impacto del IPcc, la PMA en la cuenca de la presa El Rejón sí presenta un incremento debido al cambio climático y por lo tanto en el GMD.

Con base en los resultados se concluye también que es necesario reforestar la zona alta de la cuenca debido a que la superficie del bosque de encino está decreciendo y convirtiéndose en pastizal inducido, lo que contribuye a una menor infiltración y un incremento del volumen de escurrimiento. Se sabe que éste es uno de los objetivos que considera el gobierno municipal de Chihuahua para construir el proyecto del parque metropolitano "3 Presas" en 2040, a cargo del Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN 2019-2021). Dicho proyecto contempla conservar como reserva natural el suelo en las cuencas de las presas Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón. Como trabajo futuro, se recomienda realizar una estimación del volumen de escurrimiento con un modelo de CCUS en tal zona considerando dicho proyecto.

La simulación del CCUS por medio de autómatas celulares aplicados al diseño de obras hidráulicas puede llevar a una mejor comprensión de efecto de esta variable en el ciclo hidrológico, además de modificar los criterios de diseño, mantenimiento y rehabilitación de las estructuras destinadas a la conducción, retención y almacenamiento en favor de la disminución del riesgo de falla.

Referencias

- Basharin, G., Langville, A., & Naumov, V. A. (2004). Vida y trabajo de A. A. Markov. *Linear Algebra and It's Application Elsevier*, 386, 3-26.
- CLICOM. (2018). *Base de datos climatológica nacional, Conacyt*. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Coarite-Coque, R. (2008). *Áreas de aplicación de la inteligencia artificial*. La Paz, Bolivia: Revistas Bolivianas-Scientific Electronic Library Online.
- Conabio, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2008). Mapas digitales. Recuperado de <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw.html>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2000). *Información de seguridad de grandes presas*. México, DF, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde-Álvarez, A., & Gay-García, C. (2008). *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. México, DF, México: Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Delaneze, M. E., & Setti-Riedel, P. (2018). Dinámica de modelamiento espacial aplicada a la evolución del crecimiento urbano en la vecindad de Pipelines en Río de Janeiro. *Journal of Urban and Environmental*, 12(2), 227-286.

Erlick, G., Russell, L., & Ramaswamy, V. (2001). Una investigación basada en los efectos radiativos de las interacciones aerosol-nube para dos estudios de caso del experimento MAST. *Journal of Geophysical Research*, 109(1), 1249-1269.

Fernández-Esguiarte, A., Zavala-Hidalgo, J., Romero-Centeno, R., Conde-Álvarez, A., & Trejo-Vázquez, R. (2015). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y Centro América*. México, DF, México: Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMUS).

Henríquez, C., Azócar, G., & Aguayo, M. (2006). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 36, 61-74.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1984). *Mapas digitales*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1994). *Mapas digitales*. Recuperado de <https://sinegi.page.link/Yhgf>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2003). *Mapas digitales*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>



INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Mapas digitales de uso de suelo y cobertura vegetal*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>

IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2015). *Reporte de Actividades, metodologías y evaluaciones*. Ginebra, Suiza, y Nairobi, Kenia: World Meteorological Organization y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Morales-Maqueda, M. A. (1995). *Un modelo acoplado del hielo de mar y del océano superficial para estudios climáticos*. Madrid. España: Universidad Complutense de Madrid, Dialnet Plus.

Norris, J. R. (1998). *Cadenas de Markov* (2a ed.). Cambridge, EUA: Cambridge Series on Statistical and Probabilistic Mathematics.

Pérez-Cutillas, P., Amado-Álvarez, J., Segovia-Ortega, E., Conesa-García, C., & Alarcón-Cabañero, J. (2019). La degradación ambiental y sus efectos en la contaminación de las aguas superficiales en la cuenca del río Conchos (Chihuahua-México). *Revista de la Universidad de Granada*, 58(1), 47-67.

Piontekowski, V. J., Souza-Da Silva, S., Huamán-Mendoza, E. R., De-Souza-Costa, W. L., & Campos, F. (2012). Modelación de la deforestación para el estado de Acre utilizando el programa DINÁMICA EGO. *Anais 4º Simpósio de Geotecnologias*. Pantanal, Bonito.

- Reynoso, R., Valdez, J. R., Escalona, M. J., De-los-Santos, H. M., & Pérez, M. J. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(1), 72-81.
- Rivas-Acosta, I., Güitrón-De-los-Reyes, A., & Ballinas-González, H. (2010). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el cambio climático*. Recuperado de <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/atlas.pdf>
- Sajikumar, N., & Remya, R. S. (2015). Impacto del cambio en la cobertura del suelo y el uso de suelo en las características del escurrimiento. *Journal of Environmental Management*, 161, 460-468.
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., García, R. A., & Schelesinger, P. (2006). Modelación de la conservación de la cuenca Amazonica. *Nature*, 440(7083), 520-523.
- Verburg, P. H., Kok, K., Pontius, R. G., & Veldkamp, A. (2006). *Modelación de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal*. Global Change. IGBP Series. Book. Berlín/Heidelberg, Alemania: Springer.
- Wu, Q., Li, H.-Q., Wang, R.-S., Paulussen, J., He, Y., Wang, M.,..., & Wang, Z. (2006). Monitoreo y predicción del cambio de uso de la tierra en Beijing utilizando sensores remotos y SIG. *Landscape and Urban Planning*, 78(4), 322-333.